

Wolfgang P. Riegelmayr

Industrie 4.0 – Vernetzungen für die digitale Fabrik

Leitungstechnik, Schnittstellen, Leistungsmerkmale,
Gestaltungs- und Auslegungsprinzipien



HANSER

Riegelmayr

Industrie 4.0 – Vernetzungen für die digitale Fabrik



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Wolfgang P. Riegelmayer

Industrie 4.0 – Vernetzungen für die digitale Fabrik

**Leitungstechnik, Schnittstellen,
Leistungsmerkmale, Gestaltungs-
und Auslegungsprinzipien**

Mit 195 Abbildungen und 13 Tabellen

HANSER

Der Autor:

Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Wolfgang P. Riegelmayr (M.-Walldorf), ist als selbständiger Berater, Hochschul-Lehrbeauftragter (Nachrichtentechnik), Firmendozent und Gutachter tätig. Er ist Autor zahlreicher Publikationen, darunter zwei weitere Fachbücher.



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © shutterstock.com/Monkey Business Images

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46147-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46416-2

ePub-ISBN: 978-3-446-46529-9

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Vorwort | IX |
| Einleitung | XI |
| 1 Neue Anforderungen in der Digitalen Fabrik | 1 |
| 1.1 Komplettes Kabel- und Medienmanagement – digital | 1 |
| 1.2 Breitbandiges Multiplexing – mehrkanalige Systeme (FDM/FDD, OFDM, TDM/TDD, WDM/WDD, SDH/STM) | 2 |
| 1.3 Einkanalige LAN-Technologie (CSMA/CD) | 15 |
| 1.3.1 Physikalische Strukturierungs- und logische (Ent-/)Kopplungsformen | 23 |
| 1.4 Breitbandige Parallelschnittstellen | 26 |
| 1.4.1 Beispiel Industrie-PC innen und nach außen | 26 |
| 1.4.2 Serialisiertes externes Storage Networking (einschl. USB Networking) | 30 |
| 1.5 Strom und Spannung (einschl. PoE und PLC) | 33 |
| 1.6 Digitale serielle HF-Spannungsschnittstellen | 36 |
| 1.6.1 Basisband, Gleich- und Wechselspannungsverfahren der 0/1-Logik | 37 |
| 1.6.2 Differentialverfahren, Manchester-Codierung | 41 |
| 1.7 Digitale schnelle Lowest-Power-Datenschnittstellen | 43 |
| 1.7.1 Pulsung (in Baud) und Informationscodierung auf geschlossenen Leitungskreisen | 44 |
| 1.7.2 Speisung und Triggerung über Schleifenwiderstand | 45 |
| 1.7.3 Impulsstörungen | 49 |
| 2 Kabelkanalanlage | 51 |
| 2.1 Der Außenbereich (outdoor) | 56 |
| 2.2 Kabelführungen, CPs, Kassetten, Outlets, Tanks und Modularprogramme | 57 |
| 2.3 Verteiler- und Schaltschrank-Programme | 63 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | Vernetzungsmodelle für die Digitale Fabrik | 75 |
| 3.1 | Das Gitternetz (Factory Communication Grid) | 75 |
| 3.2 | Zellulare Überlagerung und das Sechseck (Hexagon) | 78 |
| 3.3 | Vernetzungstopologien | 85 |
| 3.3.1 | Liniennetz | 88 |
| 3.3.2 | Kette | 89 |
| 3.3.3 | (Teil- bzw. Voll-)Vermaschung | 90 |
| 3.3.4 | Bus | 94 |
| 3.3.5 | Cluster | 98 |
| 3.3.6 | Stern | 99 |
| 3.3.7 | Baum | 101 |
| 3.3.8 | Clos | 106 |
| 3.3.9 | Butterfly-Netzwerk | 108 |
| 3.3.10 | Ring(e) | 109 |
| 4 | Automatisierungskomponenten und Informationstechnik in der Digitalen Fabrik | 113 |
| 4.1 | Die Feld-, Steuerungs- und Prozessebenen sowie Leitebene | 114 |
| 4.1.1 | Sensorik und Aktorik, Devices und Server | 114 |
| 4.1.2 | Konventionelle funktionale Schnittstellen RS-232, RS-422/-423 und RS-485 | 117 |
| 4.1.3 | Master-Slave(s)-Prinzip | 126 |
| 4.1.4 | Wesentliche Feldbus-Netztechniken und -Systeme auf der Basis von RS-485 oder Ethernet | 128 |
| 4.2 | Gebäudeleittechnik als Overlay-Netze | 131 |
| 4.3 | Bordnetze in der Automation und z. B. für Robotik | 134 |
| 4.4 | Zu den geforderten Echtzeitfähigkeiten | 135 |
| 4.4.1 | Verzögernde Übertragungssicherungsprotokolle und Polling | 136 |
| 4.4.2 | Echtzeit-Möglichkeit mit Kollisions-Technik | 139 |
| 4.5 | Grundlegendes und Aktuelles zu High-Speed- und Gigabit-Ethernet | 139 |
| 4.5.1 | Bus-Hub | 143 |
| 4.5.2 | Fast (dt.: schnell)/100 Mbit/s | 144 |
| 4.5.3 | Neue Transceiver-Schnittstelle | 145 |
| 4.5.4 | GEth und Lanes | 147 |
| 4.5.5 | Erweiterte offene Transceiver-Schnittstellen | 149 |
| 4.5.6 | Miniaturisierte Mehrfach-Steckertechnik | 150 |
| 4.5.7 | 10GEth | 151 |
| 4.5.8 | 40GEth und 100GEth | 153 |
| 5 | Informationstechnische Kupferkabel (wire) als digitales Übertragungsmedium | 155 |
| 5.1 | Struktur und Aufbauelemente | 155 |
| 5.2 | Allgemeine Leistungsmerkmale | 157 |
| 5.2.1 | Ausbreitungsverzögerung | 159 |
| 5.2.2 | Dämpfung unter Breitbandigkeit | 161 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2.3 | Weitere Phänomene der HF-Technik auf festen Metallleitern | 165 |
| 5.2.3.1 | Rückfluss und Reflexionen | 166 |
| 5.2.3.2 | End-Cross-over Talking | 168 |
| 5.2.4 | Weitere dB-Semantiken | 171 |
| 5.2.5 | Elektrische und andere Widerstände unter Breitbandigkeit | 174 |
| 5.2.6 | Durchmesser und Querschnittsfläche von Massivleitern sowie „Güte“ | 182 |
| 5.2.7 | Frequenz/Bandbreite der Leiter | 184 |
| 5.3 | Die 2-, 4- und 8-drähtigen HF-Kupferkabel | 190 |
| 5.3.1 | Kabelarten nach Schirmungsformen | 193 |
| 5.3.2 | Leitungs- und Kabelbündel | 197 |
| 5.3.3 | Breitbandige DSL- und andere Anschlüsse im Outdoor- und Indoor-Einsatz für die Digitale Fabrik | 199 |
| 5.4 | Steckverbindertechnik | 213 |
| 5.5 | Koaxialkabel | 223 |
| 5.5.1 | Koaxiale HF-Steckverbinder | 225 |
| 6 | Lichtwellenleiter (engl.: fibre optics) als digitales Übertragungsmedium | 227 |
| 6.1 | Vor- und Nachteile von LWL | 227 |
| 6.2 | Struktur und Aufbauelemente von Ein- bzw. Zwillings-LWL und Faserbündeln | 229 |
| 6.3 | Anmerkungen zur Optoelektronik | 231 |
| 6.4 | Brechungsprofile und „Indexe“ einschl. POF | 232 |
| 6.5 | Wellenlängen im Glasfasermedium und optische „Durchlass“-Fenster | 233 |
| 6.5.1 | Dämpfungen und Reichweiten | 234 |
| 6.5.2 | „Güte“ und Übertragungsklassen | 236 |
| 6.5.3 | Weitere dB-Semantiken bei LWL | 237 |
| 6.6 | Weitere Dispersionen | 238 |
| 6.7 | Planen mit Dämpfungsbudgets und „Link Margins“ | 239 |
| 6.8 | Baud, Symbole und Wavelength Division Multiplexing (WDM, OFDM, Wide-WDM, CWDM, DWDM, Parallel Optics) | 240 |
| 6.9 | LWL-Steckverbinder | 244 |
| 7 | Digitalfunk | 247 |
| 7.1 | Spektrum, Frequenzen, Blöcke, Bänder und Kanäle | 248 |
| 7.1.1 | (Träger-)Frequenz-Management für wireless | 255 |
| 7.1.2 | Ausgangspunkte referierter Standards und Frequenzfestlegung | 258 |
| 7.2 | Funkfeldbeschreibungen | 259 |
| 7.2.1 | Das Medium Funk in der Wechselwirkung mit der Umgebung | 267 |
| 7.2.2 | Weitere Einflussparameter eines Funksystems und Einordnungskriterien nach Techniken | 270 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 7.3 | Aus dem Regulativ | 274 |
| 7.3.1 | Nicht öffentlicher fester Funk (nöF) zum und auf dem Betriebsgelände | 274 |
| 7.3.2 | Nicht öffentlicher mobiler Landfunk (nömL) für die Produktionsstätten | 276 |
| 7.3.3 | Kurzstrecken- und Nahbereichsfunk innerhalb und außerhalb des Betriebsgeländes für jedermann | 277 |
| 7.3.4 | Funk-LAN (WLAN) im Feld (auch engl.: Radio LANs, kurz RLANS) | 280 |
| 7.3.5 | Andere und ähnliche Techniken für Applikationen der Automatisierungstechnik | 286 |
| 7.4 | Optisch breitbandig | 294 |
| 7.5 | Öffentliche Netzdienste, breitbandig und zellular | 295 |
| 7.6 | Zeitsignalempfang und Verbreitung für äußerst präzise Produktionsabläufe | 296 |
| 7.7 | Ausblick | 297 |
| | Stichwortverzeichnis | 299 |

Vorwort

Was in der anwendungsneutralen Bürokommunikation und -automation an strukturierten Verkabelungskonzepten vor 20 Jahren normativ begann und sich bewährt hat, stellt sich neuen Herausforderungen innerhalb der modernen industriellen Produktionsstätte. Großer Wert ist auf innovative Weiterentwicklungen und aktuelle Technologien zu legen, die sich eingestellt haben bzw. in Aussicht stehen. Es gilt, sich das Wissen zu eigen zu machen, an welcher Stelle genau im und am Werk sowie im breitbandigen Umfeld (WAN, MAN) neue Technologien sinnvoll genutzt werden können. Universelle Konzepte kann es hier aber nicht geben, weder bei „passiver“ noch bei „aktiver“ Vernetzungstechnik.

Prinzipiell ist für die Digitale Fabrik von höheren Anforderungen, sprich von Höchstverfügbarkeit, Sicherheitsredundanz und Flexibilität auszugehen. Auch der erhebliche Mehrbedarf an digitaler Medientechnik auf Lang- und Kurzstrecke per Kabel sowie kabellos wird relevant. Die tatsächlichen Möglichkeiten für den Ausbau und deren Aufwand müssen im Vorfeld eingeschätzt werden.

Das Buch erhebt zudem den Anspruch, wenig bekannte Möglichkeiten für Industrie 4.0 aufzudecken, deren Implementierung ins rechte Bild zu rücken und auf den Weg zu bringen sowie Verweise auf Hindernisse und Einschränkungen und Abhilfemaßnahmen zu geben.

Der Autor versäumt nicht aufzuzeigen, wie sich verschiedene Erkenntnisse übertragen lassen und er hat Neues aus der Welt der Data-Center-Ausrüstungen mit einge-

bracht. Dieses Erkenntnisfundament ist nicht nur Ideengeber, sondern erleichtert jede Projektierung. Dies schließt auch die Weiternutzung von Bestehendem ausdrücklich ein. Leider sind viele Bezeichnungen in einer informationstechnischen Vorgehensweise nicht einheitlich, teilweise sogar unbestimmt. Es gibt unterschiedliche Herangehensweisen sowie verschiedene Betrachtungsweisen zur Digitalisierung. Fachübergreifende und spezifische Synonyme, Abkürzungen (deutsch, englisch) und Anglizismen von wichtigen Fachwörtern werden deshalb erläutert.

Das Anliegen des Autors ist, die infrage kommenden Digitalmedien: „wired“ als Metalleiter, Lichtwellenleiter und „wireless“ als Digitalfunk für die Praxis darzustellen. Diese sind sich in kommunikationstechnischen Mechanismen und Abläufen bei digitalisierten Produktionsmitteln sehr ähnlich geworden und daher in vielerlei Hinsicht miteinander vergleichbar. Dies wird an Merkmalen für die Informationstechnik und Automation in der Digitalen Fabrik und nach Einsatzbereichen erläutert – auch kombiniert und innerhalb einer Übersicht hinreichend differenziert.

Dieses Fachbuch eignet sich als einführendes Lehrbuch zur schematischen Visualisierung genauso wie als Nachschlagewerk und wendet sich gleichermaßen an Entscheider, Hersteller, Management, IT-Verantwortliche, Entwicklungingenieure und Automatisierungstechniker.

Einleitung

Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Das Ziel der digitalisierten Fabrik ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt. Verschiedene Initiativen, unterschiedliche Aspekte und Gegenstände im Fokus, haben sich in diesem Zusammenhang gebildet, wie die *Plattform Industrie 4.0*, *Smart Factory*, *intelligente Fabrik*, *Factory of the Future (FoF)*, *Connected Factory*, *Industrial Internet-of-Things (IIoT)*, *IIC* etc., mit der Zielsetzung der Vollautomatisierung bzw. einem höheren Grad an erreichbarer sicherer Automatisierung produktionstechnischer Einheiten, einschließlich dem Anlagenbau, basierend auf untereinander vernetzbaren und kommunizierenden Systemen und Teilsystemen.

Zum „was man dazu braucht“ einschließlich angesagter neuer Technik gehört auch, autonome Produktionsprozesse untereinander abzustimmen und zu verknüpfen; dies geht über rechnergestützte Fertigungsabläufe hinaus. Von der Vorstellung der einheitlich durchgängigen aktiven oder nur passiven Vernetzung für *IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie, engl.: Information and Communication Technology, kurz ICT)* wurde Abstand genommen. Im Sinne einer Unternehmensstrategie „Kabelnetze als Dienste-Plattform“ ist diesem aber weiterhin und verstärkt gerecht zu werden. Nämlich dann, wenn es um Schwerpunkte mit Bestand für die Zukunft geht. Eine gewisse Durchlässigkeit (diese ebenso automatisiert) der

Ebenen der so genannten Automatisierungspyramide ist anzusetzen, wobei diese vom Prinzip her beibehalten wird, ganz im Sinne eines MES (Manufacturing Execution Systems).

Die Digitalisierung der industriellen Fertigungsprozesse selbst ermöglicht neuartige Erschließungen und muss sich konkret in der Vernetzung widerspiegeln. Es ist wie ein Zusammenwachsen zweier Welten: IT (Informationstechnik) und Automation. Deren Berührungspunkte und bereits eingetretene Überschneidungen nehmen hier einen großen Raum ein, insbesondere hinsichtlich der Eigenschaften, Sinn und Zweck, Digitalfunktionalität und Leistungsfähigkeit. Der Autor gibt dem Leser einen Überblick und Einblicke an die Hand, was es alles an relevanten Details zu beachten gilt: So kann für den Einsatzbereich Produktion das Netz an Daten selbst entwickelt bzw. konzipiert, zur Entscheidung gebracht und erfolgreich praktisch umgesetzt werden.

Hierbei wird ein infrastruktureller Ansatz verfolgt, bei dem in Grundzügen eine Vernetzung und deren Technik als kabelbehaftet und kabellos Bestand haben soll, wohl aber auch bei Änderungen und im Wandel generell zukunftsorientiert ist.

Ausgangspunkt der strukturellen Betrachtungen sind zielgerichtete bauliche Vorbereitungsmaßnahmen, aus Gründen der Anschaulichkeit vornehmlich in geschlossenen Arealen. Für die innen wie nach außen digital vernetzte Produktionsstätte wäre man damit weitgehend für *Industrie 4.0* vorbereitet, die gebotene Erreichbarkeit und Konnektivität wird berücksichtigt.

Neue Anforderungen in der Digitalen Fabrik

Ziel ist die weitergehende und tiefgreifende Integration der Fertigungsplanung mit unmittelbarer Auftragsverarbeitung (aus dem Office) bis hin zu neuartigen Produktionsgeschäftsmodellen, z. B. Vor-, Teil- oder Fertigerzeugnissen, variablen Losgrößen und Ad-hoc-Anpassungen der Erzeugnisse sowie der eingesetzten, einzusetzenden oder einsetzbaren Betriebsmittel, die dem aktuellen Bedarf angepasst, aber auch den ständigen technischen Veränderungen gerecht werden müssen. Die Praxis lehrt, dass auf beides, den mittelbaren und unmittelbaren Bedarf sowie auf technische Veränderungen, gerade bei den Weiterentwicklungen für Vernetzung, einzugehen ist. Dies ist Teil eines transdisziplinären Arbeitsgebiets für die Digitale Fabrik.

Angestrebt wird dabei eine höhere Qualität und Zeitgenauigkeit von Auslieferungen (engl.: delivery) unter Einbeziehung der sog. Supply Chain der Klein-, Mittel- und Großindustrien. Bezüglich der Vermeidung von Ausschuss, der ggf. zu entsorgen wäre, sowie der Reduzierung von (manuellen) Nacharbeiten lassen sich Kosten einsparen. Letztlich ergeben sich auf diese Weise Synergieeffekte und eine Produktivitätssteigerung.

1.1 Komplettes Kabel- und Medienmanagement – digital

Die zu erwartende Umgebung und Folgerungen

Zur Bedarfsplanung der Vernetzung für die Digitale Fabrik fügen sich allgemeine Anforderungen der Konzeption hinzu, die die Herausforderung beinhalten, welche Gestalt informationstechnische Wege gerade in der Automation annehmen können. Hier in diesem Buch werden Empfehlungen zur Umsetzung gegeben:

- Flächendeckende Versorgung von allen denkbar möglichen Aufstellungsorten für Maschinen und (End-)Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik, auch mit einem Versorgungsmaß
- Zukunftssicherheit durch Beständigkeit einerseits und Flexibilität andererseits hinsichtlich Anpassung und Veränderungen sowie Erweiterbarkeit im Hinblick auf neue technologische Entwicklungen und produktions-technische Anwendungen
- Flexibilität bei der Anschlusssituation, wenn wiederholt ein Rangieren der Fabrikationsgerätschaft und produktionstechnische Veränderungen anstehen
- Gezielte Nutzung (engl.: utilisation), und das mehrfach, des teuren Betriebsmittels; Übertragungsweg unter vertretbarer Last
- Ausfallsicherheit durch Zuverlässigkeit (engl.: reliability) und Verfügbarkeit (engl.: availability) mittels vorsorglicher Redundanz (engl.: redundancy), Wartbarkeit (engl.: maintainability) und schnellster Rekonfigurierbarkeit
- Modularität zur betrieblichen Absicherung gegen Einzel- und Mehrfachversagen (engl.: failure), schnellste Austauschbarkeit sowie Anpassungsfähigkeit, wozu auch die notwendige Reserve gehört, bis hin Skalierbarkeit in Schritte beim weiteren Ausbau
- Beherrschbarkeit durch Kontrolle und Steuerungsmöglichkeiten
- Einhaltung von Normen und etablierten Standards zwecks Integrierbarkeit und Anknüpfbarkeit an Bestehendes sowie Unabhängigkeit von (rein) geschlossenen Übertragungssystemen
- Datenschutz- und andere Sicherheitsbelange.

Die Entscheidungsfindung, zu welchen Bereichen bzw. auszurichtenden Gliederungsstrukturen die Ebenen der vernetzten Digitalen Fabrik gehören, wird gesichert, indem alle Aspekte betrachtet und Ziele sowie Begründungen festgehalten werden, die zu einer erfolversprechenden Realisierung führen. Alle Schritte sind nachvollziehbar zu dokumentieren, um später z. B. den weiteren Ausbau oder eine erneute Bedarfserkennung zu ermöglichen.

Dazu gehören auch vorbereitende bauliche Maßnahmen, wobei der absehbar zu vernetzende Gegenstand, die Eigenschaften der Übertragungsmedien ebenso wie einzubringende Lichtwellenleiter, Koaxial- und Telefonkabelartige Kupferkabel sowie Funkausrüstungen einander gegenübergestellt werden.

Wo die Kabelmeter bleiben

Um der Wirtschaftlichkeit, aber auch gebotener Sparsamkeit gerecht zu werden, ist das Kernstück jeglicher kommunikationstechnischen Infrastruktur die schematische Mehrfachbenutzung bzw. Mitbenutzbarkeit eines informationstechnischen Trägers (engl.: carrier) in der Automation, der als Ader/Faser und Funkfrequenz mitsamt zugehöriger elektronischer Bauteile vorliegt, selbst wenn es in der Praxis letzten Endes oft auf eine Einzelnutzung hinauslaufen wird.

Es ist die Ressource, die über Belegungen geteilt (engl.: sharing) wird (einer Wertschöpfung gleich) – ohne weitergehende Nachteile für die einzelnen Teilnehmenden an der Übertragungsbandbreite (engl.: transmission bandwidth). Diese kann schmal (engl.: narrow) bis breit (engl.: broad) sein, dazwischen weit (engl.: wide) – nicht unbedingt in Analogie zur gesamten digitalisierten Übertragungsrate (engl.: transmission rate) in Bit pro Sekunde (bps, bit/s), immer (nur) richtungsbezogen zu sehen. Diese Betrachtung kann streckenweise erfolgen, aber sich auch über Strecken (engl.: links) einer Verbindung (engl.: connection) hinweg ergeben und das gesamte Netzwerk (engl.: network) greifen oder auch zur Überbrückung einer Kürzestdistanz dienen. Schon bei der einzelnen Mehrfachausnutzung einer Strecke erwächst daraus eine höhere Sensibilität bezüglich einer Unterbrechung, weil dann eben mehrere Verbindungen betroffen sind, sodass mit einzelnen oder gemeinsamen Ersatzwegen und/oder weiteren kommunikationstechnischen Einrichtungen vorzubauen ist.

Im Fokus stehen ebenso aussichtsreiche Weiterentwicklungen mit konstruktiv innovativem Gehalt, die im rationalen Zusammenhang in gegenseitigen Beziehungen stehen; im Ausblick sind diese quantifizierbar sowie de facto auch Wirtschaftlichkeitsbewertungen unterworfen. Bezüglich weiterer Erschließungen und dem Umgang mit neuen Techniken im Hinblick auf augenscheinliche und mannigfaltige, feststehende und für die Zukunft anstehende Abhängigkeiten verbleiben noch genügend Freiräume.

1.2 Breitbandiges Multiplexing – mehrkanalige Systeme (FDM/FDD, OFDM, TDM/TDD, WDM/WDD, SDH/STM)

Wie die Breitband-Übertragungstechnik entstand

Ursächlich ging es auf diesem Gebiet um die Mehrfach(aus-)nutzung von Übertragungsmedien, was Kabelbündel ergab, die noch umfassend betrachtet werden. Schon unter Stückkosten-Betrachtung auf den Meter und die Anzahl im (passiven) Bündel bezogen, sind diese günstiger als einzelne Leiterpaare bzw. LWL-Fasern, die streng nebeneinander herlaufen. Diesem rein Passiven wurde dann mit paarweiser aktiver Technik zum Einsammeln und wieder Verteilen entgegengetreten, die ihre eigene gerätetechnische Stromversorgung hat bzw. haben muss und im Vorgriff als Gerätschaft in die später angesprochenen Schaltschränke gehört. Aktuell wird es spätestens, wenn eben kein Platz mehr für dicke Bündel zur Verfügung steht; dies auch zur Vorausberechnung der notwendigen bis möglichen Bandbreitenerhöhung einer bereits existierenden Ressource, die es gilt geschickter auszunutzen. Einer Frage zur Interoperabilität wäre dann nachzugehen. Eine Folge ist auch, dass das einzelne Übertragungsbit kalkulatorisch preiswerter wird (auch wenn dies so manchem Fernmeldedienst und dessen Infrastruktur-Grenzkosten mit Geschwindigkeit nach oben obliegt). Wenn sich der Gebrauchswert erhöht, sind Kabel besonnen auszuwählen. Was den expliziten Geschwindigkeitssprung in der Hierarchie betrifft, so wird die hierzulande allgegenwärtige Zweidrahttechnik eines für Nutzdaten auslegbaren Sprechkreises, die als schmalbandiger Telefonkanal mit weiteren Kanälen vorliegt, dazu nicht viel hergeben. Bei der Vierdraht- oder evtl. Sechsdraht- oder gar Achtdrahttechnik sieht es schon besser aus: Hier können (unidirektionale) Gesamtbandbreiten von mehr als 1 GHz erzielt werden, die sogar in breitbandige Nutzkanäle unterteilbar sind. (Von Subkanälen zu sprechen, könnte informationstechnisch irreführend sein.)

Bei zu erwartender dichterem Vernetzung findet sich in der Fabrik – und deshalb wird es hier erklärt – bereits Ähnliches oder gar Gleiches für die permanent und nicht permanent stehenden, aktiven Verbindungen der Digitaltechnik in der Informationstechnik zur Automation – wenn auch meist spezifiziert als geschlossene elektronische Multiplex-Systeme an Breitbandtechnologie für alle in Frage kommenden Medien wie Vier- und Mehrdrahtkabel, Koaxialkabel, LWL-Kabel und sogar Digitalfunk. So sind

diese auf der untersten Ebene – dem ein- oder mehrkanaligen Zugang – über digitale Zugangsschnittstellen mit entsprechenden Standards schon immer zugänglich gewesen. Dieses Thema nimmt im Folgenden einen breiten Raum ein mit anderen Multiplex-Techniken auf Einzelstrecken, ob es nun um geschlossene und somit betriebssichere digitale Standard-Schnittstellen mit (bit-)seriellem Zugang und gleichsam Abgang an Bidirektionalität geht, wie beispielsweise mehradrige RS-232/V.24-Schnittstellen, oder RS-422-Schnittstellen (plus RS-423) mit der mindestens anzusetzenden Vierdrahttechnik bis hin zur Punkt-zu-Punkt-förmigen RS-485-Schnittstelle. Oder ob es Speziallösungen sind für geschlossene Daten-Schnittstellen oder die offenen Möglichkeiten der eigentlich geschlossenen LAN-Technik, welche noch vertieft wird, auch in der aktuellen Fortschreibung. Sinn und Nutzen des (aktiven) Multiplexings darüber hinaus in einer realen Fabrikationsumgebung wird später diskutiert und veranschaulicht.

Was ein Multiplex-Paar enthält

Wie intern gemultiplext wird, z. B. mittels Nutzfrequenzen als Träger (engl.: carrier) und mit dem Frequenzgang, war und ist weiterhin proprietär; dies kann analoger, aber auch digitaler Natur sein – ohne oder mit vorteilhaftem Medien-Wechsel auf Coax. Ein Multiplexer-Ausgang enthält in der Regel eine verstärkende Komponente, womit eine längere Verbindungsstrecke zu seinem Gegenüber gemeinsam bewältigt werden kann, die sich dann im noch präsentierten Factory Communication Grid auslegen lässt (vgl. Bilder 3.47 und 3.48). Wenn es entfernungs-mäßig nicht reicht, so bieten sich zusätzlich verstärkende Elemente dazwischen an, wenn auch deren Aufsynchronisieren problematisch wird ab zwei Elementen; derartige Geräte gehören ebenso in den erwähnten Schaltschrank. Nicht ausgeschlossen war bei einer Multiplexstrecke, dass zur Überbrückung von noch größeren Entfernungen innerhalb und rund um eine Fabrikationsstätte bis hin in den sog. Fernbereich die antiquierten sog. Modems oder Ähnliches, ebenfalls paarweise, zwischen dem Multiplexer-Paar unmittelbar an deren Ausgängen eingebracht wurden, was dann wiederum Fragen der Konformität mit den geschlossenen Schnittstellen zu diesen aufwarf, genauso wie die der eingangsseitigen Zu- und Abgänge. (Eine Modem-Strecke kreuzt die Richtungen.) Was so ein Modem-Paar wäre, konnte auch im Multiplexer und De-Multiplexer integriert sein, eben um die noch längere Strecke zu bedienen, Letzterer als notwendiger Gegenpart zum Ersten. Man spricht auch nur bei bidirektionalen paarweisen Komponenten von Multiplexern oder kurz Muxen auf einer Ebene, wo die Richtung auf der Strecke gekreuzt wird.

Was sich für Vernetzungen in der Digitalen Fabrik anbietet

Aus den Zu- und Abgängen ergibt sich daher das klassische und weiterhin aktuelle Prinzip, das unter Mehrfachzugang bzw. Vielfachzugriff (engl.: Multiple Access, kurz MA) rangiert, nämlich an und für sich passive Multi-Point-(MP)-Kabel mehreren aktiven Nutzungen direkt zugänglich zu machen, also einer Übertragungsstrecke Busfähigkeit zu unterstellen – womöglich in Form einer Ader oder gar Funkwelle – und sich diese mithilfe von (physikalischen) Kanalbildungen mehrfach nutzbar zu machen. (Diese sind evtl. weiter in sog. logische Strukturen unterteilbar.) So galten schon zuvor die Grundsätze, die insbesondere die (vor-)konzentrierende Bündelung von langsameren Quelle-Ziel-Verbindungsstrecken erfassen, die in ihrer Gesamtheit schneller zu verwirklichen sind – auch Trunk (dt. etwa: Haupt-) genannt –, und dass es sogar noch preiswerter wird, insofern ein höherwertiges Übertragungsmedium verstärkerlos größere elektronische Nutzreichweiten im Feld der Industrieautomation zulässt. Dies gilt es in Voraussicht auf die Automationszellen- und anderen Ebenen technisch zu organisieren – statt eine Heimsuchung durch dicke Kabelstränge bzw. Kabelbäume (s. Bild 3.46) hinzunehmen. Gleichzeitig bedeutet dies eine Restkapazität an Opportunität, also eine Reserve, welche in bestimmten Situationen des Zeit-Raum-Gefüges im Hinblick auf die Blockierfreiheit mit einbezogen werden kann. Aber auch eine Ausgrenzung ist möglich, sodass die Übertragung auch bei zeitkritischen Anwendungen garantiert funktioniert.

Um die Effektivität zu erhöhen, bzw. für den Geschwindigkeitssprung auf eine höhere Kapazität ist ein breitbandigeres Medium wie Zwillings-Glasfaser, alternativ (weiterhin) Koax oder gar gerichteter Digitalfunk notwendig. Natürlich ist der zusätzliche Bedarf an aktiven Komponenten mit notwendiger Stromversorgung gegenzurechnen: ein funktionales Paar von Multiplexer und De-Multiplexer. Beide müssen sich nach dem Anschalten bzw. der Inbetriebnahme erst einmal einschwingen. Es sei erwähnt, dass bei einer endseitigen Betrachtung nur ein Multiplexer geführt wird, was bedeutet, dass es sich dabei um eine (offene) Zugangskonzentrierung bzw. -aggregation handelt, genannt Access Multiplexer, kurz AM. (Dieser wird am Beispiel eines DSL-Anschlusses mit DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) dargestellt, dem kein weiterer De-Multiplexer mit gleicher Technik und gleichem Verfahren, aber ohne definierte Schnittstelle gegenübersteht, sondern eine andere Komponente, die noch näher vorgestellt wird).

Unter einem elektronischen Multiplexer und De-Multiplexer (für die Kompatibilität), die regulativ als eigene Ausrüstung (Customer Premises Equipment/Networking,

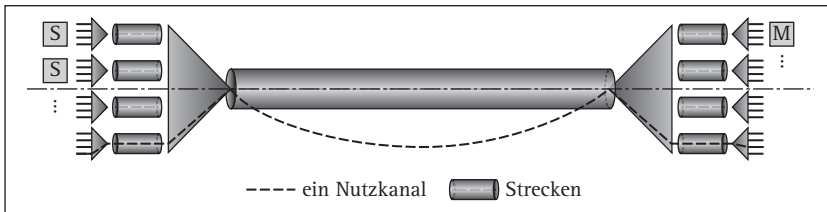


Bild 1.1
Einfache Multiplex-Hierarchie

kurz CPE/N) gefasst sind, hat man sich ein kleines Stand-alone-Gerät oder eine Karte bzw. ein (Vertikal-) Modul (vgl. Bild 1.2) im Schaltschrank-Programm oder eine Einsteck-Karte, z. B. für die Zu- und Abgänge in jeweils zwei Industrie-PC, kurz IPC, vorzustellen, die noch beschrieben werden. So lässt sich in der Automation bei der Verbindung von gegenüberliegenden Mastern zu jeweils ihren Slaves (vgl. Bild 3.47) ein elektronischer Leitungsweg gemeinsam nutzen (worüber aber im Feld wenig bekannt ist).

Statisches Multiplexing mit Bandbreitengarantie

Bei Zusammenführungen von Leitungswegen, die sonst Kabelbündel darstellen würden, kann es zu einer Multiplex-Hierarchie kommen, wobei es allerdings medienabhängig ist, wie nach dem gleichen Schema elektronisch weiter gebündelt bzw. auch unterteilt wird bei Nutzkanälen (engl.: usage channel) für Daten, sodass ein Ordnungsprinzip entsteht. Bei den sternförmigen Zu- bzw. Abgängen jeder Ebene wird es (einheitlich) einfach zugehen, da im topologischen Sinn ein Baum vorliegt, bei dem die Wurzel (engl.: root) entfällt. Bei dem geschlossenen Mehrkanalsystem ist ein beidseitiges Links-rechts-Symmetriemerkmal erkennbar, wenn auch in der Realität Zu- und Abgänge von unterschiedlicher Länge sind. Ebenso gibt es eine Oben-unten-Symmetrie. In der einfachen Ansicht einer Zwei-Ebenen-Hierarchie in Bild 1.1 im Vorgriff auf die Feldbus-Systeme von mehreren Mastern und Slaves ist beispielhaft ein Daten-Nutzkanal im Feld einer Produktionsumgebung veranschaulicht. (Der Frage, inwieweit konzentrierende Ersatzstrecken bzw. Ersatzwege mit anderer Führung der Redundanzforderung genügen, wird noch nachgegangen und die Umsetzung mittels Cross-Multiplexer wird unten bereits vorgestellt (vgl. Bild 1.3), wobei es beim noch behandelten SDH/STM-Multiplexing an Ringverknüpfungen (vgl. Bild 1.8) ein anderes Verständnis und eine andere Funktionsweise gibt.)

Seitlicher Direkteinstieg höherer Nenn-Übertragungsrate

Statistische Multiplex-Verfahren wie ein geschlossenes Übertragungssystem generieren also Mehr-Bandbreite auf der Punkt-zu-Punkt-förmigen Verbindungsstrecke bis

hin zur Breitbandigkeit. Die Frage ist, ob das einen gesamten breitbandigen Nutzkanal (engl.: usage channel) z. B. in einem Frequenzgang ausmachen kann. Insofern kein Oben-unten-Symmetriemerkmal gegeben ist (vgl. Bild 3.47), d. h. keine einheitlichen Zu- und Abgangsübertragungsraten für (End-)Stationspaare, bietet sich auch partiell der höherbandige Nutzzugang eines offenen Mehrkanalsystems an. Dies ist quasi der seitliche Direkteinstieg in eine Multiplex-Hierarchie und macht das öffentliche Netzangebot von Standverbindungen der netztopologischen Linientechnik aus. (Aus der Unterscheidung von unstrukturiert und strukturiert ist die Form (und der Sitz) der Zugangsschnittstelle zu entnehmen. Während Erstere als Daten-Nutzkanäle mit sich aufteilender Bandbreite beanspruchbar sind, bleiben die anderen ohne Kanalstruktur, d. h. ohne unmittelbaren, offenen Breitband-Zugang.)

Unter dem Begriff der Muxe kann man sich Boxen flacher Bauart an allerlei Aufstellorten vorstellen, aber zwecks einer Hierarchiebildung auch fachartige Vertikaleinschübe – quasi Muxe im Mux – in Schaltschränken nebeneinander, deren Platzierung später noch näher beleuchtet wird. Die Eingänge als Zugänge und Abgänge einer unteren Multiplex-Ebene sind im Bild 1.2 von links kommend, während die Ausgänge nach rechts angedeutet sind, der höheren Bandbreite wegen symbolisch dicker markiert. Was vertikal im Schaltschrank (vgl. Bild 2.21) als Mehrfachzugänge und singuläre Abgänge dargestellt ist, können auch DSL-Router und/oder Schnittstellen-Vervielfacher, kurz SVV bzw. SSV, und/oder (Field) Device Server bzw. anderes modulartiges Equipment sein.

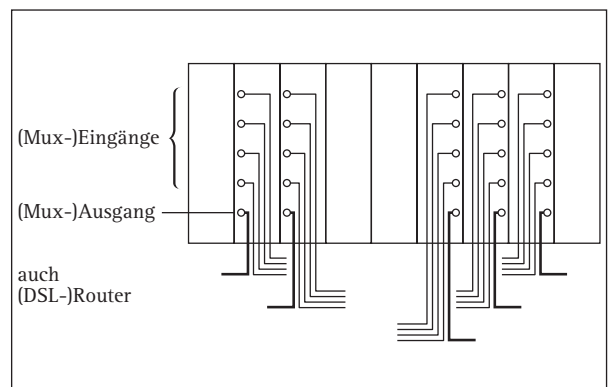


Bild 1.2 Muxe im Schaltschrank

Zur ersten planerischen Feststellung des optimalen Multiplexings dient der wurzellose Erreichbarkeitsbaum (vgl. Bild 3.49) eines Fabrikareals (ähnlich dem sich aufspannenden Baum, wenn eine singuläre Wurzel vorhanden ist, vgl. Bild 3.50). Dieser ist am Factory Communication Grid zur Zellenorganisation auszurichten, was natürlich ein Mehr an Kabelmetern bedeutet, aber anhand tatsächlich eingesparter unabhängiger Einzelstrecken ist diese Variante einfach kalkulierbar.

Statt Ersatzstrecke, mehrere Verbindungsstrecken

Besitzen die paarweisen Multiplexer mehr als nur einen Ausgang zueinander, d.h., sie werden über mehrere Strecken miteinander verbunden, spricht man von Cross-(Connect-)Multiplexing, kurz XC, also einer Parallelstrecken-Redundanz. (Beim SDH/STM-Multiplexing gleicher Bezeichnung ist es mit Aufgaben für Ringstrukturen anders.) Derartige Verbindungsstrecken sollten sich unterscheiden und am besten auf Distanz zueinander geführt werden. Cross-Multiplexer können als Knoten (engl.: node) die ein- und abgehenden Daten-Nutzkanäle mit einem untereinander abgestimmten, internen Automatismus auf den Verbindungsstrecken beliebig hin und her rangieren, was - unter der Voraussetzung von Intelligenz - einer Lastverteilung dienen mag. (Ein derartiges Schema ist nicht mit dem noch eingeführten sog. Butterfly-Netzwerk mit zusätzlicher Knoten-Redundanz zu Netzwerkübergängen zu verwechseln.) Folgende Darstellung mit mehreren Ende-zu-Ende-Nutzkanälen in Bild 1.3 bezieht sich auf das Multiplex-Beispiel aus Bild 1.1.

FDM (Frequency Division Multiplexing) und FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Es gibt aus der historischen Entwicklung im Groben zwei Verfahren, um ein auch bidirektional geeignetes Übertragungsmedium mehrkanalig - oder breitbandig für nur einen Nutzkanal - mehrfach zu verwenden bzw. dem Vielfachzugriff zu unterwerfen: Der Frequenzgang an der gesamten Bandbreite, bei Unterstellung der Busfähigkeit, wird durch sog. Getrenntlageverfahren fest geteilt (engl.:

Frequency Division Multiple Access, kurz FDMA) und den Kommunikationspartnern permanent oder erst bei Bedarf als Verbindung zugewiesen, und zwar unter Synchronitätsaufrechterhaltung, was später noch diskutiert wird, und stockungsfrei, was einer Echtzeit-Erfordernis entgegenkommt. (Beim Funk und LWL ist es ähnlich.) Oder es wird - im Sinne der Digitaltechnik mit bit-serieller Übertragung - die zur Übertragung zur Verfügung stehende Zeit (engl.: Time Division Multiplexing, kurz TDM) bemüht, um eine (physikalische) Nutzkanäle-Bildung über zeitliche Slots (vgl. Bild 1.7) zu bewirken entsprechend einer festen (Basis-)Bandbreite. Alternativ kann jede Multiplexertechnik verwendet werden, um überhaupt Breitbandigkeit für einen oder wenige Nutzkanäle zu generieren, egal ob es ein geschlossenes oder gar offenes System zur Übertragung ist.

Folgende Darstellung versinnbildlicht, wie zwei bit-serielle Flüsse unterwegs auf je eine (Träger-) Frequenz, unterschiedlich schwingend, gebracht werden und anschließend wieder rückserialisiert werden.

Digital schwer nachzuvollziehen, aber Fakt

Frequency Division Multiplexing (FDM), welches historisch analog und noch rudimentär vorhanden sowie weiterhin von Relevanz ist für das noch angesprochene Overlay-Networking in der Digitalen Fabrik, wurde der Digitalisierung durch neuartige Modulationsverfahren zugeführt. Digital-Multiplexer arbeiten nach dem Abtastprinzip (engl.: keying), das noch angesprochen wird und breiten Raum in der Digitalisierung einnimmt, wobei die Eingangssignale digitale Merkmale einer (Niedrigst-) Spannungsschnittstelle für eine höhere Übertragungsfrequenz haben. Auf der anderen Seite arbeitet der sich (immer) aufsynchrosierende De-Multiplexer weniger wie ein Filter, der die gewünschten Ausgangssignale nach einer Verstärkung (engl.: amplify) - digital wäre es eine Regenerierung - verzweigend an die zutreffenden Gegenstationen weiterleitet. Auf die Suche nach systematischen Platzierungen und wie diese funktionieren wird später noch eingegangen. Was Bild 1.4 transparent veranschaulichen soll, ist tatsächlich wesentlich komplexer, als es zunächst erscheint. Denn entscheidend ist, was und wie

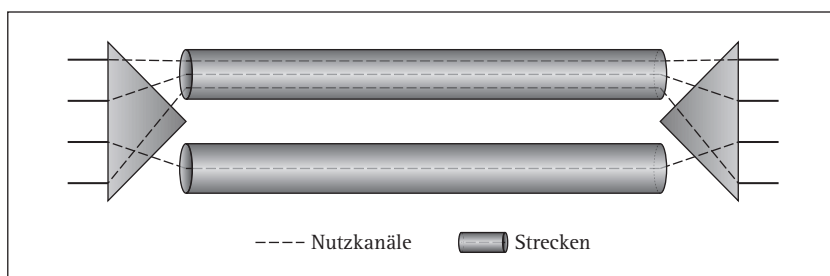


Bild 1.3
Cross-Multiplexer

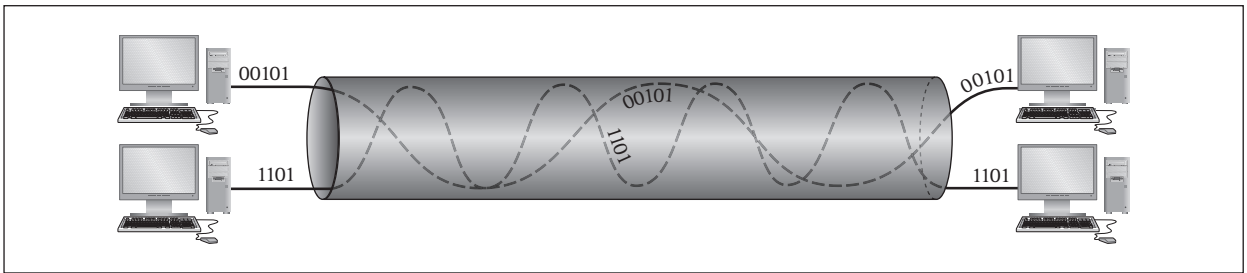


Bild 1.4 Frequency Division Multiplexing (FDM)

etwas auf die Träger unterschiedlicher Frequenzen oder gar einer singulären (engl.: single) Trägerfrequenz, kurz TF (engl.: Carrier Frequency, kurz CF), ausgehend von analogen Merkmalen digital aufmoduliert wird. Die Verfahren zwischen dem Multiplexer und De-Multiplexer sind in der Regel proprietär, wenn auch elektronisch beschreibbar, wenn es sich um Metalleiter handelt.

Wichtig ist dies auch, wenn es um konventionelle, aber multiplexfähige geschlossene serielle Schnittstellen im Zu- und Abgang in der Fabrikautomation geht, die womöglich nicht sehr weit reichen und so elektronisch gebündelt verlängerbar sind. Für den breitbandigen, digitalen Nutzkanaalzugang und -abgang gibt es eine Reihe von betriebs-sicheren Schnittstellenspezifikationen. (Wie deren Kreuzungen sowie zusätzliche Funktionssignale an Adern in Multiplexer-Paaren gehandhabt werden, galt es schon immer nachzuprüfen bzw. mit dem Hersteller abzuklären.) Derartige sich überlagernde Multiplexing-Netzwerke sind in der Diskussion, durch schnelles Ethernet abgelöst zu werden, insbesondere wenn konventionelle Schnittstellen umsetzende, paarweise (Field) Devices und (Field) Device Server zur Automation in der Digitalen Fabrik zum Einsatz kommen sollen. Wie diese Zu- und Abgänge die elektronischen Schnittstellensignale der geschlossenen seriellen Schnittstellen auf prinzipiell physikalisch einkanalig umsetzen, ist dann nachzuprüfen, da es ebenso proprietärer Natur ist.

Zunächst geht es hier um die möglichst homogene Aufteilung (nebst sequenzieller Zuordnung) der zur Verfügung stehenden Gesamtbandbreite. Dabei ist pro Nachbarkanal immer ein frequenzabhängiger Sicherheitsabstand einzukalkulieren, der dann die (Nutzkanal-)Rasterung ergibt. (Je nach Lage im durchgehenden Frequenzband oder bei

nur einem Frequenzgang haben sich mehrere Standards eingebürgert; z. B. für Frequenzblöcke, die einem Ökonomie-Aspekt für wertvolle Träger-Funk-Frequenzen unterliegen, womit zu haushalten ist, z. B. im Digitalfunk um die 20-kHz-Rasterung herum.)

Es gilt also gerade bei gleichzeitigen Hin- und Rückübertragungen über asymmetrische Leiter wie Koaxialkabel ein prinzipielles Problem zu lösen: Das eigentlich bidirektionale Medium mit nur einem Signalleiter muss gesplittet werden, hier im Beispiel als MidSplit. Denn es kann immer nur richtungsbezogen verstärkt werden, auch zwischendurch (was eine Gabelschaltung erforderlich macht). Dementsprechend kommt zwischen Unter- und Oberband noch ein weiterer Sicherheitsabstand als relativ große Mittellücke wie ein Totbereich hinzu, was gut erkennbar ist in Bild 1.5. Die so realisierbare übergreifende Paarung hin und zurück, die als Duplex-Spacing bezeichnet wird, hat an einem Ende nur die Spannungsquelle.

Uni- bzw. bidirektional zur Rücknutzkanal-Fähigkeit

Was im Bild 1.4 veranschaulicht wird, besitzt natürlich keine Vor- und Rückwärts-Zusammengehörigkeit. Generell wirft jegliches Multiplexing auch die Frage nach der Betriebsweise bezüglich der Einbeziehung eines Rückkanals als Hin- und Rückausrichtung für Signalübertragungen auf, was als Hinweg auf der Strecke gekreuzt wird zum Rückweg und vice versa. Die Spannungsquelle muss nicht unbedingt der Datensignal-Ursprung sein. Das Augenmerk gilt in diesem Buch auch der Gleichzeitigkeit entgegengesetzter informationstechnischer Übertragungen, bei denen ein Zeitverlust, der aus gegenseitigen kom-

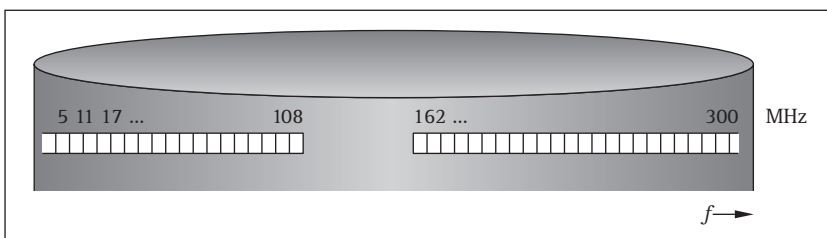


Bild 1.5

Koaxiales Kanalraster, z. B. 300-MHz-Band am Beispiel MidSplit

munikationstechnischen Abfolgen der noch beleuchteten Daten-Übertragungsprotokolle resultiert, so weit wie möglich reduziert wird. Nicht nur Sprechen ist gemeint, sondern Datenübertragung, wobei die Spannungsquelle an einer Endseite nicht zu wechseln braucht:

- Wechselsprechen (Halb-Duplex), d.h. abwechselnd im Sinne eines Entweder/Oder (exklusives OR);
- Gegensprechen (engl.: Full Duplex, oder nur: Duplex), d.h. gleichzeitige Nutzungsmöglichkeit beider Richtungen.

Bei der Nutzung von Voll-Duplex kann erwartet werden, dass die Datenübertragung aufgrund protokolltechnischer Abläufe schneller wird – gegenüber Halb-Duplex mit gleicher Übertragungsgeschwindigkeit; aber auf eine Verdoppelung der Geschwindigkeit kann nicht gehofft werden. Der Vollständigkeit halber sei auch Simplex erwähnt, ein Begriff für den prinzipiell rückkanallosen, also originär reinen und unumkehrbaren Einrichtungsbetrieb. Dieser wird ebenfalls als unidirektional bezeichnet und ermöglicht (annähernd) verzögerungsfreie Datenübertragungen, aber nur in einer Richtung. Gerade bei anderen Kanalnetzen bzw. Backend-Vernetzungen, z.B. DVD-Laufwerken mit einer parallelen Bus-Natur, ist dies nicht hinreichend miteingeschlossen und als Synonym hat sich hier ebenso Simplex eingebürgert. Ein gleichzeitiges Hin und Zurück ist und bleibt aber ein Fall für Voll-Duplex.

FDD (Frequency Division Duplex), symmetrisch oder asymmetrisch

Im Fall zweier zusammengehöriger, gegensätzlicher Nutzungsrichtungen einer endseitigen Spannungsquelle für einen Nutzkanal spricht man von Frequency Division Duplex, kurz FDD. Beim Richtungsumschalten einer Halb-Duplex-Betriebsweise wechselt nicht die Spannungsquelle, d.h., sie bleibt, wo sie ist für die Multiplex-Strecke. Bidirektional stünde hier also für die Voll-Duplex-Fähigkeit, garantiert also das gleichzeitige Senden und Empfangen in der Sende-/Empfangstechnik, Algorithmierung und insbesondere das Mehrfachzugangsverfahren (MA). Es stellt sich die einfache Frage, wie sich die zusammengehörigen Richtungskanäle mit der oben genannten Rasterung zueinander verhalten: Gleich hohe (digitale) Bandbreiten sind symmetrisch, während verschiedene Bandbreiten, aus einer Netzbetreibersicht als Down- und Upload bezeichnet, asymmetrisch genannt werden. Streng genommen liegt der noch später beleuchteten DSL-Anschluss-Linientechnik auch ein Frequenzmultiplexing, zumindest oben genanntes FDD eines Nutzkanals, zugrunde, das sowohl symmetrische als auch asymmetrische Varianten der schnellen, breitbandigen digitalen Datenkommunikation sowie evtl. eine (analoge und) digitale Mitbenutzung

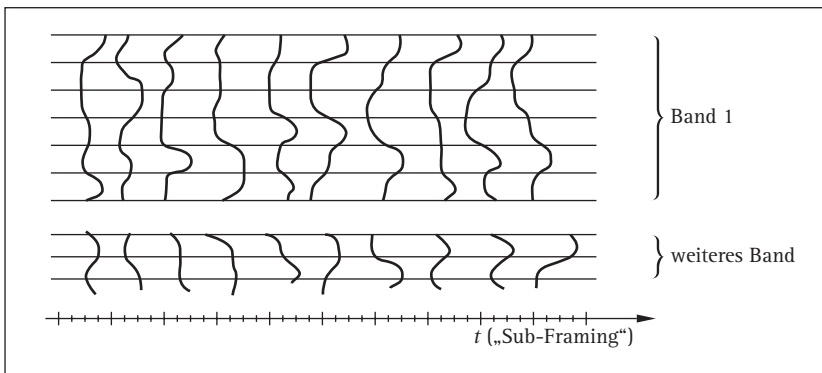
anderer schmalbandiger Dienste zulässt. Subsumierend für mehrere Nutzkanäle mit Rückkanalfähigkeit, symmetrisch oder asymmetrisch, hat sich für Hochgeschwindigkeits-Datenanschlüsse bzw. -Zubringer die Abkürzung FDM/FDD etabliert, welche aus dem Breitbandnetz des TV-Verteilnetzes hervorgegangen ist, mit koaxialen Anschlussversorgungen. (Die Begrifflichkeit symmetrisch bzw. asymmetrisch wird auch andersartig verwendet, z.B. bei Kabeln und Vernetzungstopologien, was noch vorgestellt wird.)

Mehr-Bandbreite für einzelne Nutzkanäle: Parallele Bits pro Schritt, trotzdem weiterhin seriell

Mit dem Ziel einer Interoperabilitätswahrung gilt es nun, für einen Nutzkanal (oder auch gleichzeitig einige Nutzkanäle) – schon im offenen Zugang einer Schnittstellenspezifikation – eine Breitbandigkeit zu erzeugen (bzw. sicherzustellen) oder gar durch Kopplungen zu erhöhen mit dem Ziel, mehr Bits pro Hertz zu übertragen. (Von zusammengehörigen Sub-Kanälen innerhalb eines ausmachbaren Frequenzrasters zu sprechen, wäre unzutreffend.) Im Vorgriff auf neuartige digitale Modulationsverfahren – z.B. 4-PSK bzw. Q und mehr sowie die unmittelbar daraus hervorgegangenen 16-/64-QAM an Mehrpegeligkeit – und passende Codierungsverfahren kann in einer gemultiplexten Parallelform die Mehrpegeligkeit etwas leisten zugunsten von Bit-Sequenzen (ähnlich sog. Worten). Es werden also jetzt mehrere Bits einer Schrittfolge (vgl. Bild 1.22), gemessen in Baud, kurz Bd, am Eingang zu einem (oder mehreren) Symbol(en) zusammengefasst.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Beim statischen Frequenz-Multiplexing, das Zusammenfassungen beinhaltet, stehen sich eben diese Symbole an mehreren Pegelstufen aufeinander und rechtwinklig (orthogonal) exakt gegenüber, was pro Band wie parallele Unterträger (engl.: Sub-Carrier) anmutet. Hieraus folgt die Zuordnung unter dem Begriff Digital – trotz der Einzelsignal-Abrundung (vgl. Bild 1.6), die unter Dämpfungseffekten noch behandelt wird. Dieses integrative Prinzip als weiterentwickeltes OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) verfügt über sehr hohe Bandbreiteneffizienz und hat – bei erhöhter Schritt(folge)geschwindigkeit (Baud) – den Effekt einer nicht unerheblichen digitalisierten Bandbreitenerhöhung sowohl auf asymmetrischen Metall-Leitern als auch auf symmetrischen Metall-Leiterpaaren sowie auf LWL und im Digitalfunk eines Einnutzkanalsystems. Bild 1.6 visualisiert aus der Modulation und Codierung das Phasen-Frequenz-Gefüge –

**Bild 1.6**

OFDM im Phasen-Frequenz-Gefüge mit Symbolübertragung

eigentlich ein Sonderfall des Sub-Framing-Zeit-Frequenz-Getrenntlageverfahrens mit Hilfe der beispielhaft gewählten einfachen 3-Pegeligkeit: Man muss es sich übereinander liegend vorstellen. Die eindeutig erkennbaren zusammengehörigen Signalfragmente werden beim De-Multiplexing-Schritt am Ausgang nach dem Symbol weggekippt für die folgende Bit-Rückserialisierung. (Es ist tatsächlich digital, wenn auch schwerlich an den kontinuierlichen Signalformen zu erkennen gegenüber klarer gezeichneten Parallelschnittstellen an Leitern (vgl. Bild 1.15) mit ihren sprungartigen Übergängen.)

Verknüpfbar zu Nutzkanälen

Ein weiteres Band nebenan ist angedeutet, wie sich solche als feste oder dynamisierbare breitbandige Nutzkanäle auf tun. Werden außerdem zusätzliche Trägerfrequenzen einer Rasterung hinzugezogen für nur einen Nutzkanal, so spricht man wie beim Digitalfunk von digitaler Multi-Carrier-(MC-)OFDM (ähnlich einer Vielträgermodulation für nur einen Nutzkanal). Dies, was bei Glasfasern mehrere optische Durchlass-Fenster einnehmen würde, hat als Art Underlying auch bei der LAN-Technologie Einzug gefunden. (Ansonsten steht Orthogonalität für LWL (Orthogonal Wavelength Division Multiplexing, kurz OWDM) noch am Anfang der Entwicklungen.)

Die generierte Symbolrate kann mit der Bitrate identisch sein. Wenn gute Gründe dafürsprechen, kann die Baudrate zeitbezogen sogar höher als die Bitrate sein, wie beim noch angesprochenen Manchester-Verfahren für das ursprüngliche 10-Mbit/s-Ethernet. Es kann so bei nicht extrem hoher Nutzungsbitrate auch in Bit pro Sekunde, kurz BPS bzw. bit/s, pro Band gespreizt werden, was der Robustheit entgegenkommt und wodurch innerhalb der Fabrikationsstätte auf die schwierigen Verstärker in zwei Richtungen sicherlich verzichtet werden kann. Es gilt zur Interoperabilitätsherstellung eine geeignete Signalcodierung zu finden, die außerdem einen (wenn auch nicht hinreichenden) Beitrag zur gesicherten Übertragung von Redundanzanteilen liefert. (Dies wurde früher nur mittels

eingestreuter Bits oder einfacher Prüf-Bytes gehandhabt.) Codierungsverfahren können mit einem extrem großen Aufwand so mächtig sein, dass die sog. Modulation auf Symbole entfallen könnte. Ziel jeglicher elektronischer Leitungscodierung, wovon es normativ einige für Spannungsschnittstellen gibt, ist auch, dass im Mittel keine Polarität überwiegt und so die Stabilität erhöht wird. (Polarität darf nicht mit Polarisation verwechselt werden.) Ein Evolutionsschritt des CDM (Code Division Multiplexing), wie zum Digitalfunk als CDMA noch behandelt, für Festmedien ist ausgeblieben – was auch so oder so ähnlich als proprietäre Interna für gemultiplexte Strecken infrage kommt und quasi einen Verschlüsselungseffekt hat.

Das nutzkanaltechnisch entstandene Gebilde – von dem es auch durch Modulation (und Codierung zusammengehörig) mehrere, parallele geben kann – wird in diesem Zusammenhang der Koppelbarkeit und Zusammengehörigkeit mit Lanes (dt.: evtl.: Fahrbahn, -spur, -streifen) einer Richtung bezeichnet, sowohl beim metallischen Festmedium als auch bei den LWL des Gigabit-Ethernet, bei dem (zurzeit) vier, acht oder zehn die Regel sind. Dabei geht es nicht nur um einen wichtigen Beitrag zur generellen Mehrfachnutzung bzw. zur erhöhten einkanaligen Breitbandigkeit. Ferner bedeutet dies eine weniger empfindliche Signaldämpfung und (folgeschwere) Signalverfälschung, da eine zu erwartende, digitale Intersymbol-Interferenz kaum machbar ist (durch Lücken) und die höhere digitalisierte Gesamtkanalbandbreite dynamisch bildbar wäre.

Verteilte Bandbreite

Alternativ wird auch bereits praktiziert, dass bei geforderter extrem hoher Übertragungsgeschwindigkeit, z.B. 10-Gbit/s-Ethernet und mehr, die Gesamt-Übertragungsbandbreite als serielles – genauer: serialisiertes – Einkanalssystem je Richtung auf oben genannten Lanes basierend sogar zusätzlich auf mehrere, untereinander genauestens angepasste Parallel-Leiterpaare bzw. LWL-Fasern verteilt wird. (Eine vage Verdrillung bzw. extrem

geringe Schlagzahl der Fasern genügt zur indikativen Zusammengehörigkeit.) Es könnte aber auch je (nur) eine Richtungs-Lane je einer Richtungsfaser sein. Ähnliches ist bei Frequenzen mit asymmetrischen Leitern oder im Funk möglich. Es sind auch Kombinationen denkbar, z. B. zwei Richtungs-Lanes für die erste Richtungsfaser, weitere zwei Richtungs-Lanes für die zweite Richtungsfaser etc. Kurzum: Je nach Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind unterschiedliche Variationen möglich.

Wavelength Division Multiplexing (WDM) mehr- und einnutzkanalig

Ähnlich dem FDM auf Metalleitern oder im Funk verhält es sich bei den noch intensiver behandelten LWL als Passivmedium, nur dass für Träger statt Überfrequenzen im Hertz-(Hz)-Maß jetzt die Rede von Wellenlängen (engl.: wavelength) in Nanometern (nm) ist. Folgendes wird später noch an verschiedenen Formen sowohl des Active Optical Networking, kurz AON, als auch des Passive Optical Networking, kurz PON, vertieft: Statt (recht preiswerter, aber sperriger) Faser-Bündel ist es die Innovation einer neuartigen, vorweggenommenen Multiplexform, mit einem oder mehreren Nutzkanälen pro Faser mit Wavelength Division Multiplexing, kurz WDM, sowohl unidirektional wie auch bidirektional nutzbar, wobei auch mittels Sub-Kanälen die gekoppelte Ein-Nutzkanaligkeit einer extrem hohen Bandbreite erzielt werden kann. Statt Trägerfrequenzen gibt es - im Idealfall gerasterte - Durchlassfenster (engl.: window) nach grob (engl.: coarse) und dicht (engl.: dense) unterteilt, aber eher sehr entfernungsrestriktiv. Diese beiden Varianten werden später noch näher vorgestellt und es wird auch darauf eingegangen, welche Notationen der optischen Bänder einschließlich Reichweiten-Auszeichnung hinsichtlich der elektro-optischen Technik verwendet werden. Hintergrund ist die technologische Weiterentwicklung inkl. der Abänderung von Materialeigenschaften, vornehmlich des LWL-Kerns, die weitere, voneinander unabhängige Kanäle mit günstigem Dämpfungsverlauf öffnet(e). Diese Kanäle sind mit genauen Angaben der Wellenlängen eines Von-bis-Bereichs versehen und sie werden - mit dem Funk vergleichbar - als Bänder gekennzeichnet (z. B. O, E, S, C, L, U), die sogar bis in den sichtbaren Bereich hineinreichen. Eine Hierarchiebildung ist bei WDM ausgeschlossen, wenn nicht zum Geschwindigkeitssprung jeweils erst elektronisch umgesetzt wird in derart geschlossenen Systemen.

WDD

Man bedient sich endseitig des nur Punkt-zu-Punkt-förmig Möglichen an synchronen Multiplexern und Demultiplexern vorläufig passiver (optischer) Filter, auch als Splitter bezeichnet. Der Unterschied zum oben genannten FDD ist, dass es keine Mittenlücke gibt, sodass mit einer einzelnen Faser (Simplex) sogar mit Voll-Duplex-Betrieb durch zwei Farben auf Abstand, bestimmt durchs Dämpfungsprofil, je in einen gleichzeitigen Hin- und einen Rück-Nutzkanal aufgewartet werden kann - statt wie gewohnt die Duplex-Doppelfaser (Duplex) als Zwillingfaser hin und zurück einzusetzen. Das zählt auch für ein einnutzkanaliges WDD (Wavelength Duplex Divison). Derartige Interoperabilitätsanforderungen sind jedoch noch nicht gestellt worden. In Fortschreibung und bei Varianten haben sich zurzeit die Begrifflichkeiten symmetric, für die Voll-Duplex-Fähigkeit stehend, und asymmetric für Halb-Duplex eingebürgert. Bei Letzterem wechselt beim Richtungsumschalten die Signalquelle.

TDM, TDMA und TDD

Für eine Nutzkanal-Bandbreite von 64 kbit/s werden bei dieser Linientechnik streng periodisch wiederkehrende Zeitschlitze (engl.: slot) zu einem statischen Multiplexing zugrunde gelegt für ein Zeitgetrenntlage-Verfahren, wie im Bild 1.7 veranschaulicht: Time Division Multiplexing, kurz TDM. Was bis auf die Bit-Ebene einen Slot ausmacht, definiert so die verschachtelten Nutzkanäle, was zu einer Frame-Ordnungsstruktur (dt.: Rahmen) gebracht wird, eben durch Zusammengehörigkeit der regelmäßig versetzten Zeitschlitze. (Unter Frame wird in der paketisierten Datenkommunikation der HF-Technik allerdings etwas anderes verstanden, vgl. Bild 1.11, nämlich die Rahmung selbiger mit Zusatzinformationen wie Adressierung und Übertragungssicherung, bezogen auf die Schicht 2 nach dem OSI-Referenzmodell, worauf - im Versuch - verzichtet wird.)

Synonym zur Systemtechnik PCM (Pulse Code Modulation) zur Digitalisierung, die auch Quantisierung genannt wird und nicht nur von der Wandlung von (zeit- und wertkontinuierlichen) Analog-Signalen einer Quelle ausgeht, wird das (mit dem Zwischenschritt Basisband), was passend in einen Slot gebracht wird, als Puls bezeichnet (und ist nicht zu verwechseln mit Impuls). Aber auch als digitales Modulationsverfahren werden Eingangssignale mit

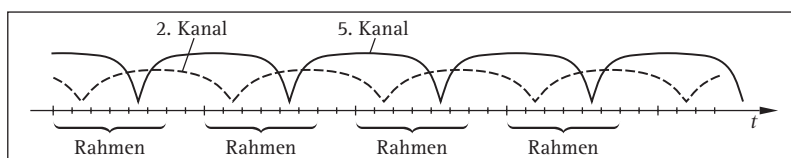


Bild 1.7

TDM (Time Division Multiplexing):
Slots für Rahmen

Digitalmerkmalen ohne Datenpaket-Bildung zwecks der digitalen Bandbreite abgetastet (vgl. Bild 5.3), deutlich verstärkt und regeneriert ausgegeben. Als Vielfach-Zugangsverfahren Time Division Multiple Access, kurz TDMA, zur Aufnahme von auf der Zeitachse verteilten und zudem verschachtelten bit-seriellen Ursprungsdigitalsignalen aufs passive MultiPoint-(MP)-Kabel tut es sich aber schwer – trotz gesicherter Interoperabilität. (Die Rede ist vom So-Bus mit vielfältigen Abbildungen an 2+1-Nutzkanälen als Mehrgeräte-Hauptanschluss, wobei diese allerdings sich direkt untereinander nicht erreichen können.)

Organisierte Zeit als Ressource

Das erste, also gröbste Zeitraster, das so getaktet ist und aus dem öffentlichen Netz(/dienst) kommt, liegt bei 8 kHz und kehrt entsprechend alle 125 μ s wieder. Dieses kann bis in den Anschluss der Inhouse-Steckdose hineinreichen und verläuft womöglich sogar über eine herkömmliche TK-Anlage hinweg. Feiner heruntergebrochen ergeben sich gemäß dem europäischen Standard (strukturiert) 30er- bzw. in Nordamerika 24er-Nutzkanäle. So werden für Fernleitungen auch Hierarchien mit weiteren, fein rhythmischen Rahmen(er)kennungsworten dazu – darunter fallen hier auch Byte-serielle Zusammenfassungen – gebildet, welche aus speziellen Bitkombinationen, auch Pulse genannt, bestehen. (Gewählte Nutzkanal-Verbindungen benötigen darüber hinaus zusätzliche Kanäle, die die umfangreiche Signalisierung aufnehmen als paketisierte Zeichengabe.)

Höherbandige, statische Nutzkanäle werden in aufeinanderfolgenden Rahmen (engl.: frame) gebildet mit dem Multiplikationsfaktor 4 für den (unstrukturiert) unmittelbar offenen Breitbandigkeit-Zugang an Schnittstellen-Spezifikationen der Festverbindungen: 2 Mbit/s, 8 Mbit/s bzw. $n \cdot 2$ Mbit/s, 34 Mbit/s und (ca.) 140 Mbit/s. Diese Offenheit ergab auch Möglichkeiten, wie die eines Quereinstiegs in die Hierarchie, was mit (privaten) vorkonzentrierenden Access Multiplexern, einzeln oder auch paarweise zum Zu- und Abgang, möglich war.

Was dabei als plesiochron bezeichnet wird, woraus sich Plesiochronous Digital Hierarchy, kurz PDH, ableitet, und hierzulande von der nordamerikanischen Festlegung etwas divergiert, ist eine im Sinne von Fast-Zeitgleichheit sehr großzügige Synchronität. Dazu wird unter Umständen mit Bits gestopft und diese wieder entfernt, um einen Zeitabgleich zu erreichen. Das heißt, eine notwendige Taktung für das Bit-Erkennen in der Empfangselektronik wird abgeleitet und beim Senden in den nächstmöglichen höheren Rahmen mit einem Geschwindigkeitssprung in direkt beanspruchbare digitale Bandbreite umgetastet (engl.: shift keying). (Ein weiteres Gestaltungsmerkmal sowie eine Gestaltungseinheit kann der sog. Burst sein.)

Wenn es gilt, das schnellere, wenn auch unscharfe Intervall abzuwarten, bis man an die Reihe kommt, so limitiert das natürlich die Bildung noch höherer Nutzer-Übertragungsraten bzw. die Hierarchie für Standverbindungen. Dies beginnt unten in der Ebene der sog. Primarmultiplex-Stufe mit 2 Mbit/s, bezeichnet als E1 (eine auf 80 kBaud basierende Signal-Codierung 2B1Q1), bzw. mit 1,5 Mbit/s als T1 bzw. DS1 nach nordamerikanischer Festlegung (mit der Codierung HDB-2, einem Pseudo-Ternär-Code) und der Wechselspannung $\pm 2,6$ V und endet als 4. Stufe bei 140 Mbit/s bzw. nach nordamerikanischer Vorstellung bei 155 Mbit/s. Wo dieses Multiplexing hier definitiv am Ende ist bezogen auf die Breitbandigkeit, erfolgt der Übergang zum notwendigen Synchronbereich, worauf noch unten eingegangen wird. Selbstverständlich werden bereits zuvor höherwertige Medienmerkmale (Vierdrahttechnik, Koaxkabel, LWL, Richtfunk u.a.) zum Einsatz kommen, um Breitbandigkeit der Stufigkeit und Entfernungsüberbrückung (operative distance) zu gewährleisten. (Außer bei Vierdrahtverbindungen, bei denen zwei gekoppelte Richtungspaare zu Voll-Duplex-Nutzkanalbildungen führen würden, sind es jedoch in der Regel, z.B. beim bereits digitalen ISDN (Integrated Services Digital Network), geschlossene Netzwerksysteme, deren Internaproprietär die Richtungskopplung bewältigen, also nicht über erwähntes Full-Duplex-Spacing verfügen.)

Ein Zeitgetrenntlageverfahren mit vorteilhafter Verwendung hinsichtlich der digitalen Nutzkanalbildung – dies gilt auch für Rückkanäle – offenbart aber eine Schwäche, wenn es um die notwendige Zeitlücke (engl.: gap) bezüglich einer zeitlichen Rasterung des (möglichen) gleichzeitigen Hin und Zurücks in der Verschachtelungspaarung als TDD (Time Division Duplex) geht. Auch hier, beim Richtungsumschalten einer Halb-Duplex Betriebsweise wechselt nicht unbedingt die Spannungsquelle. Das, was als Voll-Duplex machbar ist, reicht lediglich für den Anschluss- oder Internbereich über wenige Kilometer.

ATM

Eine Zeit lang wurde der universelle Asynchronous Transfer Mode, kurz ATM, der auch als Breitband-ISDN für alles bezeichnet wurde und eine Art breitbandige Fortsetzung zu PDH bilden sollte – und dann dynamischer Natur war –, als Lösung gesehen, bei der mit Zellen mit einer kurzen Einheitslänge von 53 Byte (abzgl. Overhead, 5 Byte) virtuelle Verbindungen (über Paths und Channels) identifiziert werden. Dies führte zum Ausblick auf offene Systemtechnik und Schnittstellen. Außerdem gab es Vorstellungen zu differenzierten Verkehrsarten, Quality of Service (QoS) und Access Control/Admission, die in einer umfangreichen Signalisierung an (weiterhin) paketisierter Zeichengabe resultierten. Geblieben ist, bezogen auf

Gewähltes (engl.: call) und permanente Verbindungen, dass es nur sehr wenige, dedizierte Einsatzbereiche gibt. Für eine mögliche Hierarchie-Bildung wäre es als vorkonzentrierende Netztechnik weiterhin tauglich. Rudimentär findet es sich noch als Leistungsvarianten an erzielbaren Übertragungsraten aufsetzend in der variantenvollen DSL-Anschlussnetz-Linientechnik.

Kombiniertes FDM(A) und TDM(A)

Natürlich kann ein FDM-Kanal nach vorheriger (Träger-) Modulation auch TDM-Nutzkanalbündel aufnehmen, so dass sich so gesehen die Gesamtkanalanzahl vervielfachen würde bzw. physikalische Kanäle einer Übertragungsstrecke Subkanäle nach dem TDMA-Verfahren ergeben, die sich jeweils (noch) weiter unterteilen ließen. Ein derartiges kombiniertes Frequenz-Zeitlage-Vielfaches mit gesamtbreitbandig Ein- bis Wenig-Nutzkanaligkeit generiert, wird aber sehr selten der Fall sein, da es eben – ohne Umweg über das Analoge – mit konsequenter Digitaltechnik einfacher geht. (Zu beachten ist, dass man keinem Trugschluss erliegt, da diese Methode entweder nur auf Kosten der Zeit bzw. Zeitübertragungseinheit oder des Kanals bzw. der Kanalbandbreite jedes Teilnehmerpaares zu verwirklichen ist.)

Ein Beispiel, wenn die Zeit für die Entfernungsüberbrückung nicht reicht

Im Digitalfunk – Grundlage des ersten konsequent digitalen Zellular-Mobilfunknetzes, auch bei rein stationärem Gebrauch, der als GSM bekannt ist – wird so auf ein kombiniertes Frequenz- und Zeitgetrenntlageverfahren mit FDD-voll-duplex-fähigen Nutzkanälen innerhalb eines Frequenzbündels bzw. -blocks ausgewichen. Es bleibt aber – trotz oft vorfindbarer Funkfeldstärke vor Ort – prinzipiell eine funktionale Erreichbarkeitsgrenze, herrührend aus den sehr kleinen Zeitschlitten gegenüber der physikalischen Laufzeitproblematik, resultierend in einer Plesiochronität. (Von einer Synchronisation kann hier ja nicht gesprochen werden.) Die ansonsten nutzfeldtechnisch zu bewältigenden Entfernungen (engl.: operating distance) sind eben aus diesem Grund limitiert. Beispiel: Der maximale Durchmesser einer GSM-Zelle von ca. 36 km ergibt sich zum einen aus (nur) tolerierten Laufzeitunterschieden (max. 16 μ s), zum anderen aus der Gesamtsignallaufzeit (max. 233 μ s) bis zur Zellengrenze eines Aufenthaltsstandortes und zurück. Und bei extrem hohen Nutzdaten-Übertragungsraten müssten folglich die Funkzellen umso kleiner ausfallen.

Sollte es mit der Entfernungsbewältigung einer breitbandigen Fernleitung oder bei produktionstechnischen Großanlagen nicht klappen, kommt ein im Folgenden vorge-

stelltes Underlying SDH/STM-Multiplexing mit Access Nodes (AN) zum Zuge, dessen prinzipielle Ring-Auslegung Vorteile hinsichtlich der vorsorglichen Redundanz liefert. Es könnte als Full Service Access Nodes (FSAN) bzw. Multi-Service Access Nodes, kurz MSAN, neben Sonderdiensten jeweils über 1000 Teilnehmeranschlusleitungen, kurz TAL (engl.: Subscriber Access Lines, kurz SAL), aus dem Kupfer des konventionellen Telefondrahts bedienen. (Gedacht ist hierzulande bei einem derartigen Metropolitan Point-of-Presence (MPoP) an die Standorte der (verbliebenen) passiven Hauptverteiler, kurz HVt, bzw. aktiven Kabelverzweiger, kurz KVz.) Mehrkanal-Multiplexer können auch mehr als einen Ausgang für die gemultiplexte Strecke haben, wobei sich die Frage stellt, wie die Verkehrsströme wieder verzweigt (Mapping) werden; in Form von Knoten könnten diese Aufgabe auch Hybride einer Datenpaketvermittlungstechnik übernehmen. Auch dort sind die Carrier-Festverbindungen, kurz CFV, mit regulierten Überlassungsentgelten für den Wettbewerb zunehmend mit dem Underlying SDH/STM für die schnellere Ethernet-Überleittechnik ausgestattet (was zuvor nur PDH-basiert war).

STM/SDH

Notwendiges synchrones Multiplexing auf Entfernung: teuer, da aufwendig

Synchronität, d.h. strenge Zeitgleichheit – unter Abzug der später noch geschilderten physikalischen Signallaufzeit (NVP) im Festnetz-Medium – ist eine Notwendigkeit für breitbandige Verbindungen in die Ferne, aber auch für industrielle Großareale/Zonen und verteilte, unmittelbare Standorte eines Unternehmens. Diese Notwendigkeit erwächst aus dem einfachen Umstand, dass zur weiten Entfernungsüberbrückung bei mehr als zweifacher Regenerierung schneller optischer Signale die Verbindung zu scheitern droht und ein Synchronitätsmechanismus zum Einsatz kommen muss bzw. ein Cross-Connect-Multiplexer (oder allgemein ein Switch o. Ä.). Deren Aufgabe ist die Aufsortierung der nun geschaffenen Virtual Container für Bit-serielle Daten anstelle von Slots/Frames und/oder Frequenzen. Der Folge ist, dass das Ganze zur umgreifenden Netzlayout-Fragestellung eines geschlossenen Mehrnutzkanalsystems wird. Unter bündelnden Multiplexing-Gesichtspunkten werden (auch hier) Ebenen einer nun synchronen Digital-Hierarchie (SDH) gebraucht, oft synonym zum streckenbezogenen Synchronous Transfer Mode (STM) bzw. bei nordamerikanischer Ausprägung ausschließlich zum rein auf LWL basierenden Sonet (Synchronous Optical Networking) einer Standard-Herstellerbezeichnung. Auf einer ähnlichen Grundlage der Standardreferenzierung reichen die komplexen, aber mit wenig Overhead daherkommenden Multiplex-Verfahren,

welche nach Section, Line und Path unterscheiden, mit jeglichen breitbandigen Digital-Fernmeldeinfrastrukturen im Hintergrund.

In der Regel, aber nicht zwingend, werden tatsächlich weitreichende unidirektionale Verkehrsringe mit großem Durchmesser gebildet. Für den Terminal Access für breitbandige Teilnehmerstationen, welcher auch Übergänge für andere Netztechniken vor Ort, wie LANs, anbietet, werden zusätzlich oft nicht selbstständige, passive Nebenringe gebildet, welche immer regenerationslos sind. (So passiv sind diese allerdings nicht, denn sie springen an, wenn Nutzerverkehr anliegt.) Während man bei Letzterem alternativ auch von Add-&Drop-Multiplexern (ADM) oder Access Nodes (AN) bzw. ausschließlich bei LWL vom ROADM (Remote Optical Add & Drop Multiplexer) spricht, kommen gerade bei den Verknüpfungen aktiver Ringe Digital-Cross-Connect-Multiplexer (DCC, auch DXC) zum Einsatz, die fast wie Vermittlungsstellen für die angesprochenen Virtual Container der Nutzkanäle mit durchgehender oder abschnittsweiser Bündelung dahinter wirken.

Derartige eingebrachte Multiplexer vereinen die Voll-Duplex-Richtungsbezogenheit. (Bidirektionale Regeneratoren gehören in die aktiven Hauptringe, wenn überhaupt.) Es können auch Einzelstrecken als eng gefalteter Ring – wie eine Zwillingsfaser anmutend – gebildet werden, die so nur als (aktive) topologische Linien-Strecke, sternförmige Versorgung oder gar als Baum realisierbar sind. Bild 1.8 zeigt, wie auch komplexe Ringstrukturen aus mehreren besagten Cross-Connect-Multiplexern und

Add-&Drop-Multiplexern in Aktiv- und Passiv-Ringen gebildet werden.

Wenn es nicht gerade sehr weit reichende aktive Einzelstrecken sind, die tatsächlich auch Ringe darstellen (vgl. Bild 3.65), so sind SDH/STM-Ring(e)-Konstrukte immer regional begrenzt wegen der Aufrechterhaltung der notwendigen Gesamt-Synchronität. (Für jede weitere Verknüpfung dieser geschlossenen Systeme ist eine spezielle Überleittechnik notwendig, die eben keine Multiplextechnik ist und die oft auf schnellem Ethernet basiert – auch graduell gesehen mit regulativ gefassten Sub-Bitraten – realisiert als Punkt-zu-Punkt-Verbindung oder als Multi-point-Bus mehrerer gekoppelter Ring-Konstrukte, was sogar redundant gestaltbar ist.) Ansonsten haben die passiven Verkehrsring-Bildungen z. B. als Zwillingsfasern im Zugang zum Aktivring die Aufgabe, dass bei einer Unterbrechung von dieser Stelle automatisiert Links-rechts-Rückringe gebildet werden. Natürlich können auch aktive Hauptringe Rückringe bilden, sodass die strukturelle Versorgung im Takt bleibt (wenn auch mit Abstrichen wegen längerer Signalläufe). Nach dem Pointer-(dt. etwa: Zeiger)-Abriss zwischen unten genannten Containern mit internem Alarm (engl.: alert) zur Folge und mittels eines Automatic-Protection-Switching-Reaktionsmechanismus (APS) einschließlich Neu-Aufsynchonisierung erbringt SDH/STM eine Spitzenleistung bezüglich der Ausfallsicherheit mit weniger als 50 ms Reaktionszeit. Zu bedenken ist, dass in diesem Fall – und das selbstverständlich immer – 50 % der Kapazität für den Rücklauf der gleichen Zielbitrate freigehalten werden müssen.

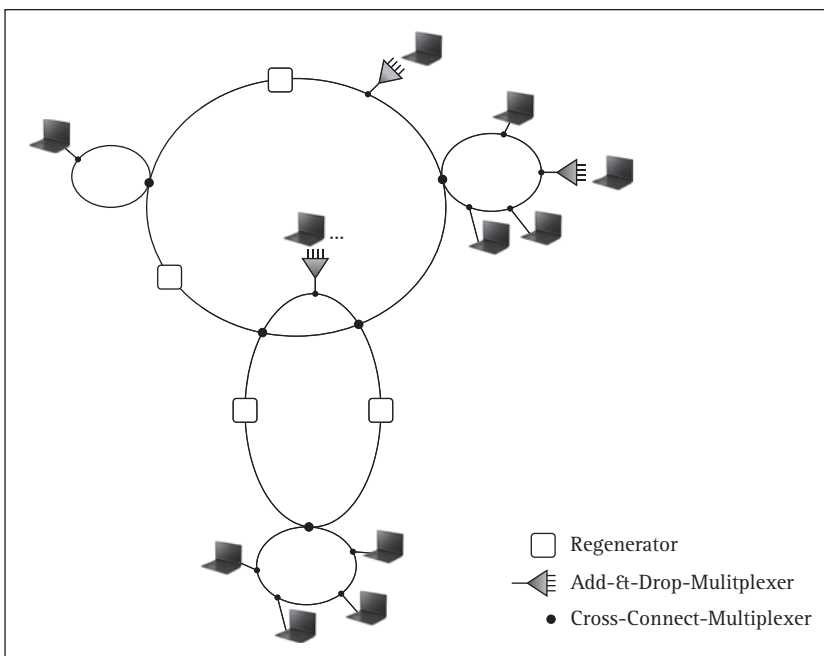


Bild 1.8

Komplexe Ringstrukturen mit Multiplexern für aktive Hauptringe und passive Nebenringe

Weitere Ausstattungen betreffen den Umstand, dass Fehler, Defekte und Anomalien deutlicher erkannt und differenzierter gemeldet werden. Die verwendeten Datenschnittstellen dürfen höchstens eine Bitfehlerrate (BER) von 10⁻¹⁰ aufweisen. Selbst einzelne Bitfehler in einem SDH-Signal – naheliegender ist eine 64/65B-Blockcodierung – mit beliebiger Rate sind detektierbar. Insgesamt sind SDH-Netzwerke auf allerhöchster Dienstgüte und -verfügbarkeit ausgelegt.

Man spricht – anstelle von Slots oder Frames – für Nutzkanaalbildungen vom Virtual Container, kurz VC, einbeziehend die Hierarchie im (mindestens) zweidimensional zu sehenden Zeitlage-Vielfach, aufgelöst in Spalten und Reihen wie in den oben genannten Multiplexern und Nodes, denen ein Indexverfahren der unvermeidbaren Signallaufzeitverzögerungen zugrunde liegt. Das ist ein probates Mittel, das (trotzdem) Hierarchie-Bildungen bewirkt und so nicht nur feste Nutzbroadbreiten verschiedener Access Payloads erzeugt. Diese Virtual Container sind unmittelbar bzw. bei Regeneratoren transparent pro Hierarchie-Ebene (hier engl.: level, layer, step, carrier, circuit, unit) nach oben als mittel- bis hochratiger Single Access beanspruchbar. Es wird zum offenen System für diverse geschlossene Zu- und Abgangsschnittstellen nach Standards, sogar für offene wie beim Ethernet. Dazu gesellen sich jede Menge (bereits bekannte) Stopfvorgänge und die folgende Wiederentnahme; eine (Zwischen-)Pufferung oder vergleichbare Effekte gibt es jedoch nicht. (Eine Verständnisschwierigkeit besteht darin, dass diese Payload bereits vorher zum Ein- und Ausgang hin mehrnutzkanalig einer internen Schnittstellenspezifikation folgend gemultiplext und sogar (einkanaliges) sehr schnelles Ethernet sein kann, aber auch als Access Node von einem xDSL-DSLAM kommen kann.)

Darüber hinaus werden mitgegebene Pointer-artige virtuelle Verkettungen (engl.: Virtual Concatenation, kurz VCAT) – manchmal auch als Envelope bezeichnet – für passgenaue Übertragungseinheiten (engl.: Transmission Units) möglich, wenn mit dem nächsthöheren Level zu viel Transportkapazität verloren gehen würde. Zusammen mit dem Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS) gewährleistet dieses System ein- und ausgangsseitig sogar die Flexibilität für dynamische Bandbreite während des laufenden Betriebs im Sinne von Hinzu- und Wegschalten von Teilkapazitäten, aber auch, um die Bandbreite zu verzweigen, z. B. im Hinblick auf unterschiedliche Wege. (Dieser Modus ist hierzulande kaum vorzufinden.) Ansonsten wäre zum Transport der sog. Start-Level als STM-1, europäisch mit 155 Mbit/s bzw. nordamerikanisch mit 140 Mbit/s, für die sog. Link Capacity anzusetzen, welche sich aus 2430 Bytes als Frame × 8 bit × 8000 Frames pro Sekunde starr berechnet. (Dieser Level passt gerade noch so zum breitbandigen Digital-Richtfunk, wie später noch angesprochen.)

Für als passiv definierte optische Träger (Optical Carrier, kurz OC) von Fern- und Nahleitungen, ausschließlich ab STM-4 bzw. STS-12 (Level), denen aktive Komponenten hinzugefügt werden, wird eine extrem schnelle Pulsung (On-/Off-Keying) – ein Basisbandverfahren, also als Return-to-Zero (RZ) zu sehen – erwartet (deren Grenze allerdings bereits erreicht erscheint). Eine grobe Hierarchie an Übertragungsgeschwindigkeiten gibt auch der Sonet-Standard – wenn auch nicht global nach ITU genormt. (In Fortsetzung aus dem Multiplikationsfaktor des Grundwerts wäre über die kleinen Unterschiede der tatsächlichen digitalen (Richtungs-)Nenn-Übertragungsrate und der erzeugten Nutzdatenrate (Payload) großzügig hinwegzusehen.) Die Analogien finden sich nicht durchgängig, aber sind im Groben ausgehend von oben genannten 155 Mbit/s (s. Tabelle 1.1): STS-3 = OC-3 = SDH 1 (auch Level 1, d. h. das unterste); für 622 Mbit/s STS 12 = OC-12 = SDH 4; für 2488,32 Gbit/s STS-48 = OC-48 = SDH 16 etc. (Level 0 hat sich für 34 Mbit/s eingeschlichen.)

Andere Notationen, die aber korrespondierend sind, sind allgemeiner, wie z. B. Optical Transmission Units, kurz OTU, eines Optical Transport Networkings, kurz OTN, aber auch granularer, wie STM-Postfix (Synchronous Transport Module) bzw. STS-Postfix (Synchronous Transport System: Step); Letztere sind mit der OC-Notation identisch.

Zielführend ist nicht nur, die zuvor erwähnten PDH-Ebenen als offene Zugangsgrundlage zu berücksichtigen, insbesondere und passend zu STM-1, der letzten, also vierten Ebene nordamerikanischer Ausprägung. Vielmehr sind – spezifiziert für (geschlossene) interne Schnittstellen – wie bei einem Quereinstieg der Interoperabilität höherratige eigenständige Transportkanäle des permanent Stehenden anzubieten. (Das ist statisch Gemultiplextes wie unstrukturierte oder eigenständige Strukturen an Nutzkanälen.)

Tabelle 1.1 Sonet gegenüber SDH-Übertragungsbitraten

| Ebene | Abkürzung | Übertragungsrate |
|----------------------------|-----------|------------------|
| Optical Carrier Level 1 | OC-1 | 52 Mbit/s |
| Optical Carrier Level 3 | OC-3 | 155 Mbit/s |
| Optical Carrier Level 9 | OC-9 | 466 Mbit/s |
| Optical Carrier Level 12 | OC-12 | 622 Mbit/s |
| Optical Carrier Level 18 | OC-18 | 933 Mbit/s |
| Optical Carrier Level 24 | OC-24 | 1,2 Gbit/s |
| Optical Carrier Level 36 | OC-36 | 1,8 Gbit/s |
| Optical Carrier Level 48 | OC-48 | 2,4 Gbit/s |
| Optical Carrier Level 96 | OC-96 | 4,8 Gbit/s |
| Optical Carrier Level 192 | OC-192 | 9,6 Gbit/s |
| Optical Carrier Level 768 | OC-768 | 40 Gbit/s |
| Optical Carrier Level 3072 | OC-3072 | 160 Gbit/s |

Um paketorientierte IP-Daten sowie Formen des dynamischen Multiplexing direkt in einen SDH-Container zu mappen, wurde das Transportprotokoll LAPS (Link Access Procedure SDH) entwickelt.

over-SDH/Sonet

Beim GFP-Protokoll (General Framing Procedure) verschiedener Ausprägung werden komplette Ethernet-Pakete und andere, wie z. B. der Fibre Channel, direkt in Virtual Container verpackt, d. h., sie werden im mehrdimensionalen Zeitlagevielfachen auch verteilt. (Zwei Modi sind definiert: Transparent GFP und Frame Mapped, wie aus der Übertragungssicherungsschicht vorliegend, was bedeutet, dass etwas eingangsseitig an Header und Trailer (vgl. Bild 1.11) abgestrippt und ausgangsseitig später wieder identisch hinzugefügt wird.)

Lokaler Fernverkehr mit Underlying

Ziel ist auch, die (Carrier Grade)-Transportkapazität von Fern-Gigabit-Ethernet und weiteren Anschluss(netz)-Linientechniken im City-Bereich in digitale, gleiche (Richtungs-)Nenn-Übertragungsraten passend zu einer der synchronen Hierarchieebenen eines SDH/STM-Underlyings zu führen bzw. verzögerungsfrei zu überführen. (Denn aufgrund der eigentlich asynchronen Natur des Ethernets – die Synchronität wird nur während der Paketlaufzeit aufrechterhalten – reicht es übertragungstechnisch nicht weit.) Der derzeitige Stand des optimalen Transcoding & Mapping beläuft sich bei 10 Gbit/s auf 9953 SDH/Sonet als STM-64 (EU) bzw. OC-192 (ANSI) bzw. OTU-2/e (ETSI, ITU-T G.703 OTN). Bei 40 Gbit/s würde ebenso gut STM-256 bzw. OC-768 bzw. OTU-3 passen. (Die kleinen Differenzen sind nicht ausschlaggebend, da Ethernet zwischenpaketbezogen asynchron läuft.) Eher unpassend wären STM-0 und STM-1 für 10 Mbit/s bzw. 100 Mbit/s, genauso wie viel zu groß – ja geradezu verschwenderisch – bei einer (nur) festen Transportkapazität von STM-16 bzw. OTU-1 für Ethernet mit 1 Gbit/s. Fraktionelle Übertragungsraten des schnellen Ethernets wie 50 Mbit/s, 150 Mbit/s, 300 Mbit/s, 500 Mbit/s, 2,5 Gbit/s etc. und andere finden schon ihren Platz in der SDH/STM-Hierarchie.

Die Herausforderung des Self-Doing optischer Träger

Um breitbandige Verbindungen industrieller Großareale/ Zonen und/oder verteilte, unmittelbare Standorte eines Unternehmens sowie extrem schnelle Ortsstrecken zwischen Betriebsstandorten zu realisieren, eröffnet die (De-)Regulation Möglichkeiten, nämlich z. B. die der über die

Grundstücksgrenzen hinausreichenden Selbstverlegung von Kabeln (eines Customer Premises Networkings, kurz CPN). Kandidaten passender Multiplexverfahren wären etwa das sehr schnelle Ethernet direkt, was noch umfangreich präsentiert wird, man kann aber auch eigenes, sinnvolles SDH/STM-Underlying für schnelles Ethernet, nämlich der eigenen (aktiven) Optoelektronik zum CPE (Customer Premises Equipment), eigene Beschaffung und Inbetriebnahme einbringen, auch im Auftrag. Hierfür gibt es Angebote an Leerrohren (bzw. -systemen) zum Einziehen bzw. zum Einblasen der dazu notwendigen, ebenso eigenen LWL.

Alternativ kann man an das kundenindividuelle, d. h. verhandelbare Angebot anknüpfen von unbeschaltet r – ohne Optoelektronik und ohne deren aktive Komponenten – Dark Fibre und diese nach LWL-Typ und Faserart der Regional- und City-Carrier mit ihren Wegerechten (als Eigentümer oder Betreiber öffentlicher Telekommunikationsnetze) direkt nutzen. Es wäre möglich, auch LWL-Steckverbindertechnik zu wählen und die Dark Fibre bis in die Fabrik geliefert zu bekommen. Darauf wird noch unter dem Begriff der MFG (Multifunktionsgehäuse) später eingegangen, wobei diese auch über passive Schaltverteiler-(SVt-)/-felder verfügen.

Dynamisches Multiplexing mit Datenpaketen

Unter statischem Multiplexing der bisherigen Anschauung – von und für permanent und nicht permanent stehende, aktive Verbindungen – werden physikalische (Ein- oder Mehr-)Kanäle verstanden, die der Zeit- und Frequenzlage sowie Symbolbildungen unterworfen sind, mit der Ausnahme des oben erwähnten dynamischen Multiplexing einer wenig bekannten SDH/STM-Variante. Statt des streng Bit-Seriellen (vgl. Bild 1.4) kann die Multiplex-Funktion auf eine sequenzielle Paketisierungsebene gelegt werden, was eher logischen Nutzkanälen an Datenpaketen entspricht mit spezifizierten Schnittstellen im Zu- und Abgang an festen sowie gewählten paketweisen Kanälen. Was zunächst als paarweise bezeichnet wurde, würde das IP (Internet Protocol) bewerkstelligen durch nicht nur paarweise vorkommende Router und andere paketvermittelnde (engl.: packet switching) Netz(werk)-Knoten statt Multiplexer, aber auch das, was weiter unten noch als einkanalige LAN-Technologie beschrieben wird (und originär knotenlos war).

Der folgenden Darstellung in Bild 1.9 kann man die entstehenden Paketlücken, die auf dem schnelleren Medium irregulär anmuten, entnehmen. Wie intern mit Paketen breitbandig gemultiplext wurde, war in der Regel proprietär, was im Bild 1.9 erkennbar ist an anderer Reihenfolge. Wie ersichtlich, geht natürlich ein Zeitgleichheitsmerkmal, bezeichnet als Synchronität, trotz Hoch- und Höchst-

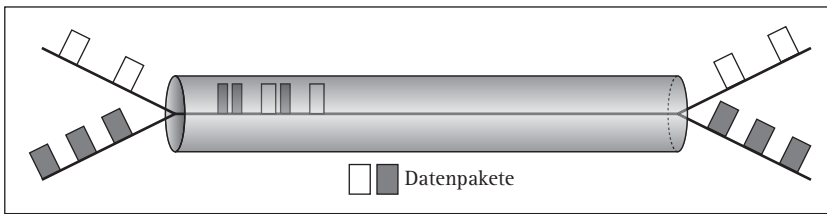


Bild 1.9
Dynamisches Multiplexing mit Datenpaketen

geschwindigkeit oft verloren; eine Bandbreiten-Garantie ist nicht gegeben und die mutmaßliche Nutzbandbreite schien historisch mit 2 Mbit/s erreicht. Auch was im Zugang (bit-)seriell paketisiert angenommen und im Abgang als Pakete abgegeben wurde, war nicht ganz klar im Hinblick auf die gute Frage, ob intern Nicht-Nutzkanäle bemüht wurden, welche die Signalisierungszeichengabe für Daten-Wählverbindungen aufnahmen (auch genannt Calls). Neben den konventionellen geschlossenen Schnittstellen gab es auch eine gewisse Offenheit als Voraussetzung, wenn Nutzdaten (bereits) nach Standard paketisiert angeliefert und abgenommen wurden. In dem Fall sprach man auch von vorkonzentrierenden Access Multiplexern, einzeln oder auch paarweise zum Zu- und Abgang verwendet.

Weg vom starren Raster nach Zeit und/oder Frequenz

Im Hinblick auf die Hochfrequenz-(kurz HF-)Technik lassen sich Daten, insbesondere paketisierte Daten, als eindeutig zuzuordnende Übertragungseinheiten zwischen Stationen – mit Ziel- (engl.: destination) und Ursprungsadresse (engl.: source oder origin) – ohne feste Rasterung über Knoten hinweg durchgehend fast beliebig übermitteln. (Die Stationen werden, da sie eigenständig sind, auch als Customer Premises Equipment, kurz CPE, bezeichnet). So können theoretisch unendlich viele Kommunikationspartner ein gemeinsames, überall hinreichendes Kabel benutzen, wie bei den historischen, tatsächlich physikalisch einkanaligen LANs, und zwar ohne (Verbindungs-) Hierarchie-Bildung eines Multiplexings – eigentlich ein Sonderfall. Mit einem derartigen Ansatz würden sogar jegliche Vermittlungs-, Konzentrations- und andere Stellen an Knotentechnik entfallen; vielmehr übernimmt bei LANs jede Teilnehmerstation diese Aufgaben mit. Die Stationen sind allesamt Rechner, vorzugsweise mit einem dedizierten Echtzeit-Betriebssystem (engl.: realtime operating system, kurz RTOS) hier in industrieller Umgebung. Auf Basis logischer Nutzkanal-Bildungen und von selbstgesteuertem Zugang greift für jeden Rechner ein verteilter Algorithmus, bei dem (meistens) pro Teilnehmerstation etwas gewartet werden muss, bis das Medium (für alle) bzw. der einzige (physikalische) Nutzkanal wieder frei ist.

1.3 Einkanalige LAN-Technologie (CSMA/CD)

Der eigentliche Nachteil der vorgenannten statischen Mehrnutzkanal-Multiplexverfahren und -systeme ist, dass so Bandbreite verschwendet wird, da sie in Momenten der Nichtbenutzung den potenziellen Kommunikationspartnern jeweils fest wie permanent zugeführt so zugeordnet bleibt. Hingegen muss bei (Durchschalte-)Vermittlungstechnik (engl.: circuit switching), wie bei Koppelfeldern (evtl. noch zusätzlich im Zeitlagevielfach), die Bandbreite bei Bedarf jeweils erst zugewiesen werden, was ohnehin einer zeitlichen Begrenzung unterliegt. Mehrnutzkanal-Multiplexverfahren sind also statischer Natur, d. h., sie bieten an spezifizierten Schnittstellen feste Zu- und Abgangsbandbreiten, die stets gleich sind, was bedeutet, dass der Bandbreitenbedarf einer gemultiplexten Strecke um ein Vielfaches höher ist als bei einer bloßen Aufaddierung der tatsächlich gleichzeitig genutzten Bandbreiten. (Wenn Bandbreite(n) nicht genutzt werden, dann bilden sich Opportunitätskosten.) Werden jedoch, wie bereits angedeutet, die Daten in Paketen der HF-Technik und nur im Moment des Bedarfs übertragen, werden zeitliche Lücken vermieden und das Übertragungsmedium ist optimal ausgelastet – trotz evtl. Wartezeiten für die Teilnehmer. Sicherlich könnten sich alle sendebereiten Stationen untereinander per kleiner Zeitverschiebungen im (fast) gleichzeitigen Zugang arrangieren, soweit kein Hochlastfall auftritt.

Höchst interoperabel für Bildung logischer Kanäle

Für die teilnehmenden Stationen, worunter man sich in Folge Clients und Server vorzustellen hat, beide gleichberechtigt einschließlich des Industrie-PC (IPC), wird bei diesem offenen Verfahren blockweise bzw. datenpaketweise – über Puffermechanismen fast lückenlos bzw. unter Ausnutzung selbiger – und ggf. aufsortiert gebündelt. Da ungenutzte Zwischenzeiten für andere dynamisiert zusätzlich nutzbar gemacht werden, ist sogar im statistischen Mittel mehr übertragbar als bei starrer Vergabe. Dies stellt einen Gewinn dar. (Zeitungeiche) Paketüber-

tragung und deren Eigenvermittlung führt über zur LAN-Technologie, was eigentlich ein geschlossenes System ist, sowie zur Lösung des offenen Zugangs eines mehr oder weniger zufälligen Eintreffens von Nutzdaten-Paketen verschiedener Ursprünge. Die beherrschbaren Kurzzeit-Warteschlangen im Puffer sind aber essenziell für Folgendes.

Ein Sonderfall des Multiple Access: dynamisch, einkanalig und mit einheitlicher Zugangsschnittstelle

Ein paketisiertes Zugangsverfahren der HF-Technik im (physikalischen) Einnutzkanalsystem (für mehrere am Datenverkehr gleichzeitig teilnehmende Stationen) arbeitet nur dann effektiv, wenn die (Start-)Laufzeit der Datenpakete im (präferierten) Einheitsmedium extrem kurz ist (während Multiplexer paarweise und unter Umständen auch in der Ferne in dieser Hinsicht nicht gut funktionieren). Dies begrenzt auch – über Inhouse-Verkabelung gemäß „Regeln für die Standardinstallation bei Übertragungswegen und Anschlüssen“ hinausgehend – schließlich den Bereich (engl.: area) zur flächenmäßigen Ausdehnung für alle Teilnehmerstationen, da die paketisierten Nutzdatensignale überall vorbeitransportiert werden müssen. Im Rahmen des Anspruchs eines transportierenden Netzwerks für alle – und nicht nur in einer Client-Server-Konstellation zur Automation – ergeben sich aber örtlich (engl.: local) in der Praxis mehrere Varianten: Es sind die für die Local Area Networks, kurz LANs, charakteristischen, speziellen (Vielfach- bzw.) Mehrfachzugriffs- und Mehrfachzugangsverfahren (engl.: Multiple Access, kurz MA) im Einnutzkanalsystem für mehrere Datenverkehr gleichzeitig teilnehmende Stationen, die als genauestens spezifiziertes MAC (Medium Access Control im Physical Layer 1) geführt werden.

Bei einer womöglich überallhin reichenden Übertragungsstrecke – zutreffend für den Inhouse-Bereich und evtl. benachbarte Gebäudetrakte, lokal und bis dato ausschließlich über ein eigenes Netzwerk ausgeführt, also ein Customer Premises Networking (CPN) – wird das Problem des potenziell gleichzeitigen Zugangs/Zugriffs (engl. beides: access) bei paketweiser Belegung untereinander zwischen allen vor Ort betroffenen Stationen selbsttätig bereinigt bzw. aufgelöst (engl.: resolve). Dieser Spontanität unterliegend (und einer Wahrscheinlichkeit unterworfen), aber kontrolliert und mit weiterer betrieblicher Absicherung (engl. etwa: operating safety) über (weitere) Protokolle darüber, greifen effektiv verteilte Algorithmen, entweder deterministisch oder stochastisch wirkend. Letzteres neigt ohnehin ab einer gewissen Last quasi einschwingend im Einkanalsystem zum Determinismus.

Zunächst als knotenlos designt fürs umfassende Funktionieren

Es waren ursprünglich bei allen offenen Alternativstandards (IEEE 802) – die Spezifikationen für die Zugangsschnittstellen erfolgten später – keine Vermittlungsstellen vorgesehen. Das heißt, dass jede Station, bestehend aus einem Rechner (mit eigenem Betriebssystem), diese Aufgabe(n) mit übernimmt wie folgt: Eine Station empfängt etwas, indem sie sich eine Kopie des an sie adressierten Nutzdatenpakets zieht, welches im Bus, Ring etc. unterwegs ist, während die anderen es ignorieren, bis es zur Löschung kommt. Dadurch sind schon von sich aus für erfolversprechende paketisierte Übertragungen sehr hohe Datenraten, mindestens im Mbit/s-Bereich, erforderlich, was allerdings im Sinne hoher Nutzübertragungsraten nur dann performant funktioniert, wenn die aufeinander reagierenden Rechner/Nutzer nicht allzu weit voneinander entfernt sind. Grund ist die noch später angesprochene Ausbreitungsgeschwindigkeit (NVP) der Pakete und Signale (wie z. B. Collision-Detection) der HF-Technik, was als noch nicht einmal Lichtgeschwindigkeit enge Grenzen setzt.

Das exakte Kriterium aus dem bereits historischen Verständnis, wann hier ein LAN vorliegt bei den anvisierten gemeinsamen Punkt-zu-Punkt- und sogar Mehrpunktverbindungen, lautet: Die jeweilige maximal absehbare Ende-zu-Ende-Signallaufzeit zwischen Stationen dividiert durch eine Stationssendedauer – als Paketlänge (in bit) durch eine Nenn-Übertragungsrate (in bit/s) – muss kleiner als 1 sein. Hieraus folgt, dass zu jedem Zeitpunkt nur ein Paket unterwegs ist, also das Medium über eine sehr kurze Dauer vollständig mit diesem einen belegt bzw. besetzt ist; dann ist es erst einmal wieder frei (engl. hier: idle). Erreicht wird dies für ein physikalisches Einkanalsystem durch komplexe, aber bewährte Verfahrensweisen entsprechender, tatsächlich verteilter Algorithmen schon ab dem Moment des offenen Zugangs bzw. bei jeglichem Versuch dazu. (Diese sind sich bei wired und wireless immer ähnlicher geworden, wenn bei Letzterem auch weiterhin funktionale Abstriche hinsichtlich des Entwicklungsur-sprungs hingenommen werden müssen.)

Das logisch-funktionale Medium: Komplett belegt mit nur einem Paket

Dies wiederum heißt, dass das Senden erst zu Ende sein darf, wenn mit dem potenziellen Empfang begonnen wurde, was auch für die am weitesten entfernte Station möglich sein muss; es zieht sich quasi hin. Hieraus resultiert wiederum eine Mindest-Paketgröße nebst unten vorgestellter zeitlicher Mindest-Zwischenlücke an Paketübertragungen. Beide, Punkt-zu-Mehrpunkt- sowie Punkt-zu-

Punkt-Netzwerke wie eine Linientechnik (der sog. Short und Long Hauls), lassen weitere Verbundstrukturen von Verbindungen (der Inter-Connections) zu bzw. die Verkehrslasten (engl.: traffic load) lassen sich übertragungszeitgerecht logisch-funktional durch Entkopplung gestalten (und dienen auch der Sicherheit); das wird auch Traffic Shaping (dt. etwa: Verkehrsgestaltung) genannt. (Eine Zusammenfassung nach hochlastiger Anzahl tatsächlicher oder möglicher Belegungen, eben paketweise, mittels der Dauer gegenüber der nächstgrößeren Zeiteinheit, hat keine Aussagekraft.)

Im Sinne eines angestrebten Determinismus wie beim Multiplexing sind die historisch bedingten, nennenswerten (Mehrfach-)Zugangsverfahren auf ein Einheitsmedium in Halb-Duplex-Betriebsweise beschränkt. Ein Beispiel wäre das Token-Passing für Ringe – genauer: mit Sternkoppler, genannt MAU (Multistation Attachment Unit) nach IEEE 802.5 (der mindestens einen Stern als realisierten Ring abgibt, vgl. Bild 3.42). Nach IEEE 803.4 existiert auch ein Umlauf der zyklischen Weitergabe der ebenso paketisierten Sendeberechtigung (Token) als Token-Bus, bekannt unter der Herstellerbezeichnung ARCnet. Dieser ist zwar selten, aber im Produktionsumfeld noch anzutreffen, und wird später noch kurz angesprochen.

An und für sich wären alle Verfahren als gleichwertig zu betrachten; sie unterscheiden sich aber bezüglich ihrer klassischen Einsatzschwerpunkte und hinsichtlich ihrer initial festgestellten Leistungsfähigkeit an erzielbarer Datenübertragungsrate. (Das Bewertungsmaß zu dieser Leistung ergibt sich aus der Gesamtanzahl der Stationen, wobei eine theoretische Maximalzahl nie erreicht wird bzw. sich die Entfernung je eingebrachter Station quasi kalkulatorisch verkürzt: Dann bleibt es gut.) So wäre die stochastische Alternative CSMA/CD, im Folgenden en detail behandelt, für die verschiedenen Formen des Dateitransfers besonders effektiv, während Token Ring besser für Dialoge geeignet ist. Letzteres überträgt zwar nicht in Echtzeit, bietet aber den Vorteil eines nicht variierenden, geringen zeitlichen Versatzes (Isochronität). Dieser ergab sich aus der zusätzlichen Latenz hinsichtlich der tatsächlich bitweisen Zwischenpufferung der im flächenlimitierten Ring (per elektromechanischem Relais-Schalter) aktiv aufgenommenen Stationen, während nicht genutzte möglichst selbsttätig ausgeklinkt sind, d. h., den Ring klein halten.

Weitere Eigenheiten kamen hinzu, nämlich der eigentliche, unverrückbare Ring, der auch als Trunk bezeichnet und unidirektional über funktionale TCUs (Trunk Coupling Units) geschlossen wird. Dort liegt gegebenenfalls aus betrieblichen Sicherheitsgründen ein sog. Sekundär-ring vor. Jedoch haben komplexe Konfigurationsregeln sowie der Aufwand für Generierung, Umlaufüberwachung, Zeitsteuerung etc. bezüglich des (Single) Tokens –

das ein zirkulierendes, zu generierendes, zu überwachendes etc. Spezialpaket darstellt, um ein Paket im Hinblick auf den Sendewunsch einer Station einzufangen – diese geordnete Alternative mittels Zentralfunktionen, genannt Token Ring Manager, ins Hintertreffen gebracht. Außerdem kann ein Token schon mit angehängten Nutzdaten einer anderen Station belegt sein, zulässig oder nicht. Zudem wurde ein Geschwindigkeitsupgrade höher als 4 Mbit/s bzw. 16 Mbit/s vernachlässigt – da die festgestellte starke Ringverkürzung zur Notwendigkeit würde.

Im Gegensatz zum damaligen Ethernet/CheaperNet, in dem nur und ausschließlich dann bei Datenübertragungen (je nach Version) bis zu 3,5 V gefahren wird, sind Token-Systeme aktive Medien mit einer anliegenden Ruhespannung von 4,1 V bis 7 V für eine Trägerfrequenz von 16 MHz bzw. 32 MHz, die sicherstellt, dass das Token überhaupt umlaufen kann. Beim von Token gesteuerten Ring hängen also die realisierbaren Entfernungen pro Anschlussstrecke oder zwischen den MAUs nicht nur von elektrotechnischen Planwerten, sondern von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab, wie Umlaufzeit (des möglichst freien Tokens), Fähigkeit der Stationen zum Aufsynchronisieren, verwendeter Spezialkabeltyp einschließlich LWL-Alternativen. Außerdem gestalteten schnell notwendig werdende (Analog-)Zwischenverstärker (engl.: amplifier, nicht zu verwechseln mit der Übersetzung für Endstufe gegenüber der Vorstufe, engl.: exciter) jegliche Planung sehr schwierig. Auf all das muss durch Zähler- und Zeiteinstellungen beim Zugangsprotokoll zusätzlich Rücksicht genommen werden. Die verwendeten originalen Datenstecker der Fa. IBM wirkten klobig, wenngleich sie auch von hoher Qualität waren.

Andersartige Alternativen wie das Multiple-Token-Verfahren oder bei Bedarf eine zusammenhängende dynamische Bandbreite per Reservierungsschritt, wie beim Demand Access Multiple Access, kurz DAMA, ebenso reich an Zentralfunktionen, haben sich wegen ihrer noch höheren Komplexität als nicht handhabbar erwiesen – wenn auch so manches in stark reduzierter Form vom Design her in den schnellen Digital-Datenfunk eingegangen ist.

Im Sinne eines rein dezentral und so eher wahrscheinlichkeitsbedingt funktionierenden Mehrfachzugangs (engl.: Multiple Access, kurz MA) im geschlossenen Einnutzkanalsystem für mehrere am Datenverkehr gleichzeitig teilnehmende Stationen wird das CSMA/CD-Verfahren (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) noch näher vorgestellt. Dieses wird landläufig unter der Alt-Markenbezeichnung Ethernet geführt, standardisiert nach IEEE 802.3 bzw. sodann (global genormt) nach ISO 8802.3. Die Mächtigkeit des CSMA/CD-Verfahrens reicht so weit, dass selbst Highspeed Ethernet und Gigabit Ethernet in bestimmtem Umfang wie vorgesehen selbst

switchlos weiterhin machbar sind mit der Bus-Verkablung an ursächlich Punkt-zu-Mehrpunkt-Strukturen (engl.: Point to Multi-Point, kurz PtMP bzw. P2MP). Aber auch bei reinen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (engl.: Point to Point, kurz PtP bzw. P2P), welche nur einen gesamten Einnutzkanal für nur zwei Stationen beanspruchen, wird CSMA/CD benutzt. Die Verbindungen – beide als Endstationen adressiert und zusätzlich z. B. mit IP – können permanent bestehen, was der Forderung nach Echtzeitfähigkeit entgegenkommt. Sie können aber auch mit zeitlichem Verzug gewählt und dann auf- und abgebaut werden, was auf der nächsthöheren Protokollebene geschieht – sodass das Ganze mischbar ist. Beides wäre selbst bei einer Linientechnik (Short und Long Hauls) ein Sonderfall eines eigentlich nicht notwendigen, aber auf diese Weise endseitig abgegriffenen Busses bei nur zwei Stationen bzw. zwei Zugangspunkten (engl.: Access Points). Das beidseitige Abgreifen ist und bleibt essenziell für das noch präsentierte Abtasten eines schwachen bzw. schwach gewordenen Signals, was unter Umständen weitreichend sein kann, gerade wenn die Vorzüge der weiter entwickelten digitalen Ethernet-Übertragungstechnik an Modulation und Codierung zum Tragen kommen. Wie dann das Signal – quasi in den Äther, jetzt als Metallleiter wie ein Antennen-Feeder, ursächlich koaxial, später auch als 4-Draht, gefunkt/emittiert – weiterlaufen kann, gerade im oben genannten Punkt-zu-Mehrpunkt-Bereich, und zwar verzögerungsfrei, wird noch vorgestellt.

Der beherrschte Faktor Zufall im Mehrfachzugang

Durchgesetzt hat sich schließlich beim Ethernet der offene, ungeordnete (Einnutzkanal-)Zugriff als Hineinhören (Sensing) im Hinblick auf Frei oder nicht oder gar Kollisionsfeststellung mit und von den Komponenten, die rein zufällig das Gleiche tun, nämlich bei eben noch angeblich Frei gleichzeitig anfangen zu senden. So bezeichnete Kollisionen können also zwangsläufig entstehen, wenn auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit, aber abhängig von nachbarschaftlichen Verhältnissen und schließlich der unten erklärten gesamten Signallaufzeit im Netzwerk. Initiale Varianten des 1-, 0-, 01-Persistent (dt. etwa: beharren auf) offenen Zugangs haben sich im Allgemeinen in Theorie und Praxis als kaum Performance-unterscheidend gezeigt. Sie haben sich aber als interoperabel erwiesen; d. h., sie können untereinander kommunizieren und wären vermischt funktionstüchtig. Hier geht es in drei Varianten darum, ob ein sofortiger Eingriff – bei einer intervallartigen Mindestzeit –, weiteres Warten bis zum erneuten Sendeversuch, wenn Frei festgestellt wurde, oder ein grundlegendes Abwarten bis zum erneuten Sensing(-Versuch) auf besagtes Frei gewährt wird. Derartige Verfah-

rensvarianten sind allesamt dezentraler Natur, da alle aufgenommenen Stationen gleichberechtigt sind, wobei aber durch zentrale bzw. zentralistische Steuerungsschritte, wie z. B. aus dem Master-Slave-Prinzip, eingegriffen werden könnte. Daran setzen Protokolle (die im OSI-Referenzmodell höher anzusiedeln sind) z. B. mittels eines gezielten Stationsabrufs zum konfliktfreien Senden bzw. des kurzzeitigen Zurückhaltens eines Sendeversuchs an.

Sowohl die Frei-, als auch die Kollisions-Feststellung der eigenen Station übernahm ein Bauteil am eigentlichen Übertragungskabel mit, genannt Transceiver, ein Kunststoff aus Transmit und Receive. Dazu erfolgten entsprechende Meldungen – aber auch Rückmeldungen des Detektierten, wenn selbst kollidiert – an die teilnehmende Station. Im Fall des originären Ethernets ist es nur an bestimmten und ringmarkierten Stellen an einem dicken Buskabel (Yellow Cable) in Koaxialform eine passive Ankopplungskomponente (wie eine kleine Box), genannt AUI (Attachment Unit Interface), die natürlich auch Sendedaten von der dazugehörigen Station einspeist und sich eine Kopie der Empfangsdaten, was dann auch weiterläuft im Koaxialkabel, für die Station herunterzieht. Die elektronische Sammelleitung an nur einem Innenleiter darf nicht allzu oft angezapft werden, was in eine Anzahlrestriktion mündet. Von diesem überall vorbeikommenden, speziellen Buskabel geht dann jeweils eine bis zu 50 m lange Stichleitung, evtl. sind es auch mehrere, an die Teilnehmerstationen ab oder – nicht empfehlenswert – diese Verbindung wurde womöglich über (kaskadierbare) Fans-out Units (dt.: Fächer) weiter verzweigt. In der angebundenen Station selbst ist es ein integrierter oder sogenannter AUI-Adapter gewesen.

Ein AUI-Schnittstellenkabel, das auch unzutreffend mit dem Begriff Transceiverkabel bezeichnet wird, ist die eigentliche (Zugangs-) Spezifikation einer sicheren geschlossenen Schnittstelle mit D-Sub-15-Steckverbindern an beiden Enden und mehradrig mit doppelter Schutzschirmung, also dick und sperrig. In diesem finden aber keine Kollisionen (mehr) statt, wobei sich die (insgesamt) max. Länge von normativ 50 m aus der Laufzeit des Erkennens – Rückmeldung: Frei/Besetzt oder gar Kollision – und des Reagierens berechnet. Insgesamt ergeben sich zuverlässige, einfache Konfigurationsregeln zur Gesamt-Nutzreichweite, die ein LAN ausmacht.

Bei der preiswerteren Cheapernet-Variante mit dünnem Koaxialleiter (Black Cable) – und deshalb geringerer Reichweite (und nur Geflechschirmung gegen Emissionen und Immissionen) – wird zum Stationsanschluss das Kabel an ebenfalls ringmarkierten Stellen durchtrennt und ein T-Stück (s. Bild 3.33) als unmittelbarer Anschluss-Steckverbinder gesetzt. Dieses findet sich dann direkt an dem LAN-Adapter, der den Transceiver on board enthält; ein AUI-Kabel als solches entfällt also, die Schnittstelle

bleibt aber. (Mittels T-Stücken kann das Black Cable auch bis zu einer höchstzulässigen Segment-Länge ausgedehnt werden, welche aber geringer ist als beim Yellow Cable.) Insofern werden zum leistungsgerechten Funktionieren Anforderungen an strukturelle Netzwerk-Merkmale gestellt, denen im weiteren Verlauf noch nachgegangen wird, passend als Bustopologie oder in anderen Abbildungsformen, und die anhand von allgemeinen Vor- und Nachteilen ableitbarer Eigenschaften vorgestellt werden. Denn ein funktionaler Bus kann verkabelungstechnisch z. B. ein Stern sein. (Inwieweit beim Warten auf eine erfolversprechende Übertragung eines Nutzdatenpakets in der HF-Technik auch noch Warteschlangen-Mechanismen zum Zuge kommen, ist nicht Gegenstand dieses Buchs, kann aber auch an einer Vernetzungstopologie abgelesen werden.) MA-Verbindungen entsprechen also einer Mehrere-Kabel-Konnektivität, wobei sonst die Kabel parallel verlaufen müssten bzw. als Kabelbündel und -stränge, anschlussfertige Kabelbäume etc. Dies darf nicht verwechselt werden mit der Anzahl der Signalleiter (engl.: conductor) in einem einzelnen Kabel, nämlich bis zur Achtadrigkeit, auch paarweise (bzw. Glasfasern), und unter den Umständen der bitseriellen – genauer: serialisierten – schnellen Übertragungstechnik an (Puffer-)Schnittstellen dahinter. Der Stand der Dinge ist, dass auch eine parallelisierte Form auf gekoppelten Lanes möglich ist bzw. notwendig wird, was noch ausgeführt wird. Es bleibt aber bei einem Einkanalssystem.

Der Sensibilität des Leistungsverlusts in der erzielbaren Nutzdaten-Übertragungsrates wird mit der Vermeidung von wahrscheinlichsbedingten Zugriffskonflikten gleichberechtigter Teilnahmestationen im Bus entgegengetreten, indem der (gleichberechtigte) Wettbewerb (engl.: contention) zum Ziel gemacht wird (was zu Fehlinterpretationen verleitet). Es ist die (jeweilige maximal auszumachende) Ende-zu-Ende-Signallaufzeit im gesamten (vielleicht auch sich verzweigenden) Bus, die planerisch zu fixieren ist. Sie ist bei CSMA/CD der ausschlaggebende Faktor für das korrekte und leistungsstarke Funktionieren einer ursächlich aus zwei Medientechniken (Koaxialkabel, LWL) über Segmente (jeweils nach Maximallänge und Anzahl) hinweg bestehenden, maximalen interoperativen Distanz, die gestreckt tatsächlich mehr als 4 km lang sein könnte: die potenzielle Worst-Case-Betrachtung einer Collision Domain, was hier eine gewisse Geschlossenheit definiert. Dies sollte nicht missbraucht werden, auch wenn bei nur Punkt-Punkt-Verbindungen mehr drin ist bzw. gewisse Lastformen es zulassen würden. Dementsprechend sind die einzelnen und gesamten Längenrestriktionen und prinzipiell kollisionslose Transceiver-Kabelstrecken mit einbezogen; natürlich ist dies auch auf Verkabelungssysteme anwendbar, worauf später noch eingegangen wird.

Die Gesamt-Laufzeit, so besagt es ursprünglich die normative Festlegung, darf 51,2 μ s einschließlich einer Schutzzeit nicht übersteigen, was der kleinsten zulässigen Länge eines Paketes – wie es sich das Medium belegend hinzieht – von ca. 64 Byte seriell entspricht, sodass womöglich der Paketinhalt mit irgendetwas zu stopfen wäre, damit niemals etwas unkontrolliert im Medium on the fly unterwegs wäre. Es darf auf dem Übertragungsmedium der (physikalischen) Nutz-Einkanaligkeit für mehrere am Datenverkehr gleichzeitig teilnehmende Stationen zu jedem Zeitpunkt nur jeweils ein einziges Datenpaket zu Sende- und Empfangsvorgängen in der HF-Technik unterwegs sein. Dazu gibt es natürlich eine unten erwähnte normative Maximalgröße der Datenpakete, damit im MA andere auch eine Chance haben, die in die Übertragungssicherung (vgl. Bild 4.11), z. B. gegenüber Bitfehlern und anderem, eingeht. Dann funktioniert ohne vermittelnde Stellen ein einkanaliger Mehrfachzugang (MA) des Carrier Sensing (CS) mit dem Zusatz Collision Detection (CD). Ersteres ist etwas missverständlich, da es keinen eigentlichen Träger als HF-Trägerfrequenz gibt; gemeint ist die Feststellung einer laufenden Datenpaketübertragung und die daraus resultierende kurzzeitige Selbst-Blockierung. Dies ist der erste implizite Regelkreis; es folgt noch ein weiterer: Der zweite Regelkreis dient der Entdeckung, wobei sonstige Störungen mit eingeschlossen sind: Ein effektiv verteilter Nachlaufalgorithmus soll mithilfe von Zufallszahlen plus zeitlicher Hochlaufverdoppelung (Binary Exponential Backoff, kurz BEB) potenzielle Zugriffskonflikte letztendlich beheben. Der Effekt ist optimal und garantiert einen bestimmten Durchsatz bei großvolumigen Übertragungen, wenn auch variierende Verzögerungen (engl.: delay) auftreten wie gegenseitig aufsortiert, und das ohne vermittlungstechnische Eingriffe.

Auswirkungen höherer Übertragungsrates im LAN

Soweit tatsächlich kein Switch o. Ä. im Einsatz ein (Standard-)Segment (auf)teilt, würde sich bei einer Migration mit einem Sprung auf eine höhere Nenn-Übertragungsrates im Netzwerk, z. B. (jeweils) um den nur so erscheinenden Faktor 10, die zulässige Ende-zu-Ende-Signallaufzeit aus der medienabhängigen Nenn-Ausbreitungsgeschwindigkeit (NVP) um den gleichen Faktor reduzieren – unter der Prämisse beibehaltener maximal zugelassener Paketlängen, in der Regel ca. 1500 MByte. Sonst müsste diese größer sein. Tatsächlich wäre dies so anzusetzen, sofern und nur dann, wenn ein Bus bei Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen beibehalten wird, von dem bei den Kürzestdistanzen in der Switching-Fabric alternativ Gebrauch gemacht wird. Aber ebenso müsste sich auch die zeitliche Mindestlücke zwischen den Datenpaketen um eine Zeh-

nerpotenz reduzieren, wenn dem nicht das reaktive Zeitverhalten der noch präsentierten Sicherungsprotokolle darüber entgegenstehen würde.

Wenn also nicht mit vorgenannten Einschränkungen im Bus zu rechnen wäre, funktioniert das CSMA/CD auch bei noch größeren Entfernungen (engl.: operating distance) von reinen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wie eine Linientechnik. (Tatsächlich gibt es hier Varianten hinsichtlich der Kompatibilität, welche in Bezug auf die Robustheit und das Leistungsvermögen diskutiert werden könnten.) Folglich könnten bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen – insbesondere bei noch höherer Geschwindigkeit und entfernungsbedingt nicht mehr einem wirklichen Bus für MA entsprechend – sogar mehrere Datenpakete nun zulässig on the fly hintereinander auf dem Kabel unterwegs sein, was einen Bruch der Regel darstellen würde, es aber nicht mehr ist. Schließlich fangen Übertragungswiederholungen bzw. Retransmissionen des (an Timer und Counter etwas großzügigeren) Sicherungsprotokolls der Schicht LLC (bzw. Data Link im Bezug zum OSI-Referenzmodell) für die Datenintegrität alles ab, was als Übertragungsstörung, Falsch- oder Fehlbehandlung von Ungereimtheiten empfunden wird. Lediglich und zu guter Letzt nicht erkannte Zugangskollisionen im Richtungsumschalten der Halb-Duplex-Betriebsweise sind noch von Belang.

Wichtig ist, dass im Hinblick auf die Entfernung keine der Stationen bevorzugt wird, indem womöglich ein näher am Empfänger liegender Sender sich gegenüber einem anderen im Moment des zufällig gleichzeitigen Zugangs zur korrekten Übertragung durchsetzt zum Zeitpunkt drohender Kollision. Dazu trägt auch z.B. die elektronische Manchester-Signalcodierung bei, wie noch erläutert wird. Denn hierbei gilt ein normativer Zwischenabstand (engl.: interframe gap) für Datenpakete in der HF-Technik, der strikt einzuhalten ist. Die abgestimmte zeitliche (Intervall-)Lücke erlaubt das Senden bzw. einen Sendeversuch bei Frei und beträgt normativ mindestens $9,6 \mu\text{s}$, damit die Transceiverfunktionen korrekt ablaufen können im Hinblick auf das für alle eindeutig feststellbare Nicht-Belastet für ein Datenpaket, sodass andere auch eine faire Chance zum Senden haben.

Der Hintergrund drohender Kollisionen ist, dass bei einem auf metallischem Festleiter basierenden Bus mindestens zwei Sender evtl. und zufällig gleichzeitig auf (HF-)Besetzt mithören und diese gleich lange warten. Als erst einmal

zurückgestellt, würden deren Datenpaket-Sendungen unweigerlich kollidieren. Als das auch mithörbar und genauso wie alle anderen Involvierten unverzüglich abzubrechen wäre, was auf nur eine Teilkollision (aus der Laufzeit bewirkt) hinauslaufen würde, aber mit gleicher Tragweite, würde sich der Konflikt anhaltend wiederholen – wenn nicht der oben genannte BEB als effektiver Nachlaufalgorithmus die Zugriffskonfliktparteien trennen würde. (Bei reinen Punkt-zu-Punkt-förmigen LWL-Verbindungen ist es etwas anders und die Frage ist natürlich, ob sich die Lücke gerade bei weit verbreiteten Mini-LANs oder als eine noch schnellere Ethernet-Linientechnik (des sog. Short und Long Hauls) nicht doch verkürzen ließe).

Ein Optimierungsansatz mit CSMA/CA – CA steht jetzt für Collision Avoidance, d.h. im Ziel Kollisionen vermeidend – hat im Hinblick auf eine vorlaufende Reservierungsphase für metallische Festmedien und LWL keinen Performance-Gewinn ergeben, sich aber im Medium Digitalfunk als klar vorteilhaft erwiesen, was noch ausführlich erläutert wird.

Prinzipiell steht dem offenen Vielfachzugriff und -zugang die kabelgerechte Nutzertrennung, welche noch breiten Raum einnimmt, aus mannigfaltigen Gründen nicht entgegen. Zum Beispiel breiten sich dann Folgewirkungen eines netztechnischen Problems erst gar nicht über das geschlossene Einkanalssystem hinaus aus, bei denen andere Produktionseinheiten mitbetroffen wären; es dient also auch der betrieblichen Sicherheit. Der folgenden Darstellung in Bild 1.10 sind die klassischen Ethernet-Grundkomponenten zu entnehmen; weitere Vorstellungen folgen später, von denen viele noch Gültigkeit haben, auch wenn sie als physikalisch überholt gelten. (Weiterentwicklungen an Fast- und Gigabit-Ethernet werden später vorgestellt.)

Der echte Bus und dessen Segmente: keine Ende-Ende-Signalreflexionen

Was begrenzt beim Bus eigentlich elektrotechnisch eines der mehreren möglichen Segmente, aber auch einen einfachen Verzweigungsstrahl, wenn das CSMA/CD wirken soll? Es wären zunächst die Rückflüsse bzw. Reflexionssignale eines später noch ausgeführten asymmetrischen Leiters zu betrachten. Auf einfache Kabelverlängerungen innerhalb der normativen Segment-Längenbegrenzung

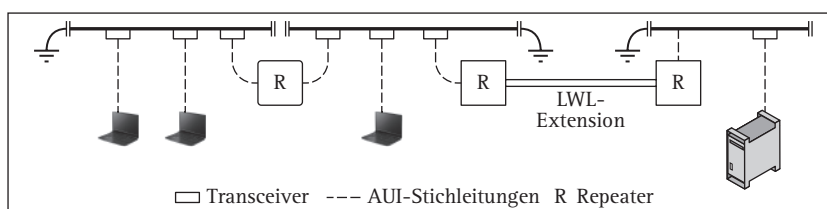


Bild 1.10
Klassische Ethernet-Grundkomponenten